UNIVERSIDAD DE DEUSTO

NUEVO MECANISMO DE CONTROL DE TOPOLOGÍAS EN REDES INALÁMBRICAS AD-HOC DEFINIDAS POR SOFTWARE PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Tesis doctoral presentada por Joaquin Ernesto Aparicio Hernández
dentro del Programa de Doctorado en Ingeniería para la Sociedad de la Información y Desarrollo Sostenible

Dirigida por Dr. Jon Legarda

UNIVERSIDAD DE DEUSTO

NUEVO MECANISMO DE CONTROL DE TOPOLOGÍAS EN REDES INALÁMBRICAS AD-HOC DEFINIDAS POR SOFTWARE PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Tesis doctoral presentada por Joaquin Ernesto Aparicio Hernández

dentro del Programa de Doctorado en Ingeniería para la Sociedad de la Información y Desarrollo Sostenible

Dirigida por Dr. Jon Legarda

El doctorando El director El director

Bilbao, enero de 2018

Nuevo mecanismo de control de topologías en redes inalámbricas Ad-Hoc definidas por software para la mejora de la eficiencia energética

Autor: Joaquín Ernesto Aparicio Hernández

Director: Dr. Jon Legarda

La siguiente dirección web contiene información actualizada sobre esta tesis y temas relacionados:
`http://oceano.biblioteca.deusto.es/primo_library/libweb/action/search.do?vid=deusto&reset_config=true`
Texto impreso en Bilbao
Primera edición, enero 2018

A todo investigador que intente aportar.

Abstract

Wireless Adhoc Networks (WANETs) have a key role in the development of Internet of Things (IoT). Although the integration of WANETs with IoT presents important benefits, it also poses new technical challenges that have to be addressed. An important challenge is the low-power operation of WANETs, since WANETs are generally energy constrained and inefficient energy use could compromise those IoT services. Moreover, the energy efficiency is a key factor in order to extend the netowrk lifetime. Software Defined Networking (SDN) is a technology that enables network administrators to manage network services by abstracting low-level functionality, by means of a separation of the data plane and the control plane. This dissertation proposes a solution that, based on SDN, addresses the energy consumption enhancement in WANETs. In such solution, the network intelligence is placed in a controller that can be accessed through different controller gateways within a WANET. This network intelligence is in charge of running a Topology Control (TC) mechanism in order to build the backbone of coordinator nodes. Therefore, nodes only need to perform forwarding tasks; besides, they require less local processing capacity and the message retransmissions are reduced, which results in an improvement of the network lifetime. Consequently, a coordinated algorithm to minimize energy consumption in WANETs using the SDN model and TC mechanisms extends the current network approach where the control plane is linked to the type of deployed WANET. In our proposal, the new control plane abstraction makes the network intelligence a separate component regarding to the underlying WANET network type. Thus, this SDN based controller abstraction

determines which nodes are the most useful for communication and the routing framework in a given time; as a result, the flood of messages within the network decreases because less local processing and control messages are required. Also, this approach provides a workaround between nodes to dynamically define network topologies, redundant schemes, neighbourhood clusters and build network areas that execute low-power modes. In order to evaluate the performance of the proposed solution and to compare it with a distributed approach, a set of simulations under controlled conditions has been conducted. Results show that the network lifetime increases with the SDN approach when two or more controller gateways are deployed.

Resumen

Las redes inalámbricas Adhoc (WANETs) tienen un rol clave en el desarrollo de soluciones del internet de las cosas (IoT). A pesar de que la integración de WANETs con IoT presenta beneficios importantes, también plantea nuevos desafíos que deben ser abordados. Desde que las WANETs son generalmente limitadas en energía, un uso ineficiente de su consumo energético podría comprometer los servicios de IoT. Además, la eficiencia energética es un factor clave para extender el tiempo de vida de una red. Las redes definidas por software (SDN) son una tecnología que habilita a los administradores de red para administrar los servicios de la red abstrayendo la funcionalidad de bajo nivel, es decir, separar el plano de datos y el plano de control. Este trabajo de investigación propone una solución que se basa en la tecnología SDN para abordar los problemas de consumo de energía en las WANETs. En dicha solución, la inteligencia de la red es gestionada en un controlador (o varios) que puede ser accedido por diferentes pasarelas. Esta inteligencia de red está a cargo de ejecutar mecanismos de control de topologías (TC) para construir una columna vertebral de nodos coordinadores. Por lo tanto, los nodos solamente necesitan ejecutar tareas de reenvio, con lo que además, se requiere menos capacidad local de procesamiento y los mensajes de retransmisión se reducen, lo que resulta en un incremento del tiempo de vida de la red. Consecuentemente, un algoritmo coordinado para minimizar el consumo de energía en WANETs usando el modelo SDN y mecanismos de TC amplía la visión actual de la red donde el plano de control depende del tipo de red WANET desplegada. En esta propuesta, la nueva abstracción separada del plano de control convierte a la inteligencia de la red en un componente

separado con respecto al tipo de red WANET subyacente. Así, esta abstracción basada en SDN determina qué nodos son los más útiles para la comunicación y el esquema de encaminamiento en un particular instante de tiempo. Como resultado, la inundación de mensajes dentro de la red decrece ya que se requiere menos procesamiento local y mensajes de control. Desde este enfoque es posible aplicar cambios dinámicos en la interacción del trabajo entre nodos para definir topologías, esquemas de redundancia, agrupación de vecindarios y establecer áreas de red que operen con modos de bajo consumo energético. Para evaluar el rendimiento de la solución propuesta y compararla contra un enfoque distribuido, se han efectuado un conjunto de simulaciones en entornos de laboratorio. Los resultados muestran que el tiempo de vida de la red se incrementa con un enfoque basado en SDN cuando se despliegan dos o más pasarelas controladoras.

Agradecimientos

La finalización de esta tesis ha sido posible gracias al apoyo del proyecto Eulalinks bajo el acuerdo Nº4545 del programa Erasmus Mundus, la recomendación de la Universidad José Simeón Cañas UCA, El Salvador y de la tutela y dirección de la Universidad de Deusto, Bilbao. Gracias a Diego López de Ipiña por su apoyo y abrirme las puertas del laboratorio de DeustoTech. Gracias a Jon Legarda por su acompañamiento en la dirección de esta tesis sin el cuál no fuera posible la culminación de esta investigación. Gracias también a todos los compañeros del laboratorio MORElab los grupos de investigación de INTERNET y TELECOM que me han dado una luz en la oscuridad en diversos momentos de este camino y que también me acogieron de una forma muy grata compartiendo su conocimiento y tiempo de recreación. No podría olvidarme tampoco de agradecer a mi familia y amigos de toda la vida que son un apoyo fundamental y me transmiten una fuerza enorme de motivación. Por último, agradecer de cierto modo a mi ciudad natal Santa Ana y mi segunda ciudad Bilbao por todos esos momentos que me han dado de sus sitios, sus gentes, sus culturas, sus sombras y sus luces, todos ellos formando mi abstracción.

Padiush, Muchas gracias, Eskerrik asko,

Joaquin Ernesto

enero 2018

Índice general

Índice de figuras **xv**

Índice de tablas **xix**

Acrónimos **xxi**

1 Introducción **1**

1.1 Motivación 4
1.2 Hipótesis 7
1.3 Objetivos 8
1.3.1 Objetivo general 8
1.3.2 Objetivo específicos 8
1.4 Metodología de Investigación 9
1.5 Estructura de la Tesis 13

2 Antecedentes **15**

2.1 Arquitectura de IoT 16
2.1.1 WANETs dentro del IoT 17
2.2 Iniciativas de Redes Programables 20
2.2.1 Administración y Uso Inteligente de las Redes Adhoc . . 20
2.2.2 Redes Programables 21
2.2.2.1 Tecnologías y Protocolos de Redes Programables 22
2.3 Redes Definidas por Software 31
2.3.1 Implementaciones SDN 32
2.4 Protocolos SDN 34

2.4.1 Openflow 34
2.4.2 BGP 34
2.4.3 NETCONF 35
2.4.4 OVSDB 35
2.4.5 XMPP 36
2.4.6 MPLS-TP 36
2.4.7 Discusión 37

3 Estado del Arte **39**
3.1 Técnicas para la eficiencia energética de redes inalámbricas 41
3.1.1 Eficiencia Energética por Capas Distribuidas de Redes Inalámbricas 41
3.1.1.1 Mecanismos de Encaminamiento 42
3.1.1.2 Algoritmos Unicast 43
3.1.1.3 Algoritmos Multicast 45
3.1.1.4 Capa MAC 48
3.1.1.5 Capa de Aplicación 49
3.1.1.6 Gestión de Topologías y Subgrafos de Redes . . 50
3.1.1.7 Conclusiones 53
3.1.2 Eficiencia energética por SDN 55
3.1.2.1 Enfoques SDN para la Consciencia Energética en Redes Inalámbricas 55
3.1.2.2 Virtualización SDN en Redes Inalámbricas . . . 56
3.1.2.3 Técnicas de Control de Topologías de Redes . . 56
3.1.2.4 Manejo del Espectro Electromagnético con SDN 57
3.1.2.5 Desacople de la administración de los grafos de redes inalámbricas 58
3.1.2.6 Discusión 60
3.1.3 Eficiencia energética en redes homogéneas y heterogéneas 61
3.1.3.1 Administración Separada del Plano de Control y Plano de Datos 63
3.1.3.2 Redes Autogestionables 65
3.1.3.3 Mecanismos por Demanda 66

3.1.3.4 Enfoque SDN para la Consciencia Energética en Redes Heterogéneas WANETs 66
3.2 Resumen, Discusión y Conclusiones 68
3.2.1 Discusión 69
3.2.2 Conclusiones 73

4 Plano de Control Definido por Software en WANETs 75
4.1 Contexto de Ejecución 78
4.1.1 Alcance del Enfoque SDN 78
4.1.2 Núcleo de Ejecución 79
4.1.3 Núcleo del Algoritmo de Conservación de Energía 81
4.2 Arquitectura General 83
4.3 Diseño 86
4.3.1 Lógica de Funcionamiento 86
4.3.2 Diseño de Plano de Control 87
4.3.3 Diseño de Plano de Datos 88
4.3.4 Base de Conocimiento 90
4.3.5 Diseño de Entidades Auxiliares 90
4.4 Directrices de Operación 94
4.4.1 Abstracciones del Plano de Control 94
4.4.2 Definición de Estados 96
4.4.3 Comparación Utilidad Entre Vecinos 99
4.4.4 Selección de Rutas Hacia las Pasarelas Controladoras . . . 104
4.5 Encaminamiento 107
4.5.1 Capacidades de Encaminamiento 108
4.5.2 Errores en el Grafo de Red 111
4.6 Evaluación 115
4.6.1 Propiedades del Algoritmo 115
4.6.2 Extensiones del Plano de Control 116
4.7 Resumen 118

5 Consumo de Energía en WANETs Estáticas Definidas por Software 119
5.1 Comportamiento Susceptible al Uso de Energía 121
5.1.1 SDN en WMN 121
5.1.2 WMN integradas a IoT 122
5.2 Consumo Energético en Escenarios de Nodos Estáticos 123
5.2.1 Definiciones Iniciales 123
5.2.2 Consumo Energético 124
5.2.3 Tiempo de Vida de la Red 126
5.3 Discusión de Resultados 129

6 Consumo de Energía en WANETs Móviles Definidas por Software 133
6.1 Antecedentes 134
6.1.1 Modelos de Movilidad de Entidad 134
6.1.2 Modelos de Movilidad de Grupo 138
6.2 Comportamiento Susceptible al Uso de Energía en Escenarios de Nodos Móviles 141
6.2.1 Modelo de Red 142
6.3 Ambiente Experimental 143
6.4 Evaluación 146
6.4.1 Tiempo de Vida de la Red 149
6.4.2 Análisis de Número de Saltos de Paquetes 150
6.4.3 Múltiples Pasarelas de Acceso al Plano de Control 150
6.4.3.1 Sensibilidad en Consumo Energético 151
6.4.3.2 Sensibilidad en el Tiempo de Vida de la Red . . 154
6.4.3.3 Sensibilidad de el Número de Saltos de Paquetes 155
6.4.3.4 Análisis de Uso de Nodos Coordinadores 156
6.5 Resumen 159

7 Conclusiones 163
7.1 Conclusiones Finales 165
7.2 Contribuciones 168
7.3 Publicaciones Relevantes 170
7.4 Líneas Abiertas de Investigación 171

Bibliografía **173**

Índice de figuras

1.1 Metodología de investigación utilizada. 12

2.1 Metáfora Árbol del IoT. 17
2.2 Taxonomía propuesta para redes IoT. 18

3.1 Taxonomía protocolos UNICAST. 44
3.2 Áreas de operación de algoritmos de conservación de energía utilizando TC en WSN. 50

4.1 Abstracción SDN de capas en diferentes modelos de red. 79
4.2 Capas de operación de Cross-over-net y Openflow. 80
4.3 Contexto general del algoritmo. 80
4.4 Proceso central del algoritmo propuesto. 82
4.5 Representación física de la arquitectura. 84
4.6 Representación lógica de la arquitectura. 85
4.7 Lógica de funcionalidad. 87
4.8 Diseño de la abstracción plano de control. 89
4.9 Diseño de la abstracción plano de datos. 89
4.10 Proceso de retroalimentación a la base de conocimiento del controlador. 90
4.11 Estructuras del plano de datos. 91
4.12 Estructuras dinámicas. 93
4.13 Abstracciones distribuidas del plano de control central. 95
4.14 Estructura vecino de vecino. 98
4.15 Proceso de asignación de utilidades. 101

4.16 Proceso de compración de utilidades. 103
4.17 Conexiones entre nodos de una red. 107
4.18 Pseudocódigo de llamada a tipo de encaminamiento. 109
4.19 Pseudocódigo de evaluación de rutas. 110
4.20 Pseudocódigo de prueba de conexiones en el grafo de red. 113

5.1 Comportamiento del factor de energía (área 400m x 400m). Hay 10 nodos distribuidos aleatoriamente durante una simulación de 800s. 124
5.2 Comportamiento del factor de energía (área 500m x 500m). Hay 20 nodos distribuidos aleatoriamente durante una simulación de 800s. 125
5.3 Comportamiento del factor de energía (área 500m x 500m). Hay 30 nodos distribuidos aleatoriamente durante una simulación de 800s. 125
5.4 Comportamiento del factor de energía (área 1000m x 1000m). Hay 50 nodos distribuidos aleatoriamente durante una simulación de 800s. 126
5.5 Comportamiento del tiempo de vida de la red (área 400m x 400m). Hay 10 nodos distribuidos aleatoriamente durante una simulación de 800s. 127
5.6 Comportamiento del tiempo de vida de la red (área 500m x 500m). Hay 20 nodos distribuidos aleatoriamente durante una simulación de 800s. 127
5.7 Comportamiento del tiempo de vida de la red (área 500m x 500m). Hay 30 nodos distribuidos aleatoriamente durante una simulación de 800s. 128
5.8 Comportamiento del tiempo de vida de la red (área 1000m x 1000m). Hay 50 nodos distribuidos aleatoriamente durante una simulación de 800s. 128

6.1 Patrón de movimiento de un nodo móvil usando el modelo de movilidad caminata aleatoria. 134
6.2 Patrón de movimiento de un nodo móvil usando el modelo de movilidad punto de ruta aleatorio. 135
6.3 Patrón de movimiento de un nodo móvil usando el modelo de movilidad dirección aleatoria. 135

6.4 Patrón de movimiento de un nodo móvil usando el modelo de movilidad área de simulación sin límites. 136
6.5 Patrón de movimiento de un nodo móvil usando el modelo de movilidad Gauss-Markov. 136
6.6 Patrón de movimiento de un nodo móvil usando el modelo de movilidad versión probabilística del enfoque de caminata aleatoria. . 137
6.7 Patrón de movimiento de un nodo móvil usando el modelo de movilidad sección de una ciudad. 137
6.8 Movimiento de tres nodos móviles usando el modelo de movilidad por columnas. 138
6.9 Movimientos de siete nodos móviles usando el modelo de movilidad comunidad nómada. 139
6.10 Movimientos de seis nodos móviles usando el modelo de movilidad de persecución. 139
6.11 Patrón de movimiento de un grupo (tres nodos) usando el modelo de movilidad punto de referencia de grupo. 140
6.12 Comportamiento del factor de energía con densidades de 10 y 20 nodos 147
6.13 Comportamiento del factor de energía con densidades de 30 y 50 nodos 147
6.14 Evolución del factor de energía con diferentes densidades de nodos. 148
6.15 Evolución del tiempo de vida de la red con diferentes densidades de nodos. 149
6.16 Evolución del número de saltos de mensajes con diferentes densidades de nodos. 151
6.17 Comportamiento del factor de energía con densidades de 10 y 20 nodos 153
6.18 Comportamiento del factor de energía con densidades de 30 y 50 nodos 153
6.19 Evolución del factor de energía con diferentes densidades de nodos. 154
6.20 Evolución del tiempo de vida de la red con diferentes densidades de nodos. 155

6.21 Evolución del número de saltos de mensajes con diferentes densidades de nodos. 157
6.22 Llamadas a coordinación con diferentes densidades de nodos. . . . 158
6.23 Número total de coordinadores con diferentes densidades de nodos. 158

Índice de tablas

2.1 Tendencias en redes programables 23
2.2 Tecnologías y protocolos de redes programables 30
2.3 Comparación protocolos SDN de redes 38

3.1 Principales conflictos de la conciencia energética en redes inalámbricas 71

5.1 Mejores rendimientos de consumo energético 130

6.1 Configuración de parámetros de la simulación 145
6.2 Configuración de parámetros de la simulación 152
6.3 Comparación del factor de energía y tiempo de vida de la red con diferentes densidades de nodos. 156
6.4 Resumen de mejores rendimientos de consumo energético en WANETs móviles 160
6.5 Mejores rendimientos en uso de información de coordinación para Cross-over-net 160

Acrónimos

4D Four Dimensions

ABR Associativity Based Routing

AMRIS Adhoc Multicast Routing Increasing id-NumberS

AMROUTE Adhoc Multicast Routing Protocol

ANTS Active Network transport System

AODV Adhoc On-demand Distance Vector

API Application Program Interface

AS Autonomus System

ASCENT Adaptative Self-configuring Sensor Network Topologies

BGP Border Gateway Protocol

CAMP Core-Assisted Mesh Protocol

CANEs Composable Active Network Elements

CDS Connected Domain Sets

CE Control Element

CGSR Clusterhead Gateway Switch Routing

CLUSTERPOW Clustering Power Control

ACRÓNIMOS

COMPOW COMmon POWer

CQMP Consolidated Query-packet Multicast Protocol

CRN Cognitive Radio Networks

CWN Cognitive Wireless Networks

DDM Differential Destination Multicast

DEMAC aDaptative Energy-efficient Media Access Control

DLMST Directed Local Minimum Spanning Tree

DRNG Directed Relative Neighbourhood Graph

DSA Dynamic Spectre Access

DSDV Destination Sequence Distance Vector

DSR Dynamic Source Routing

EAR Energy Aware Routing

EC-MAC Event Centric - Media Access Control

ECCKN Energy Consumed uniformly-Connected K-Neighbourhood

ECDS Energy Efficient Distributed Connecting Dominating

EXR Exclusive Routing

FE Fowarding Element

FoRCES Fowarding and Control Element Separation

FPGA Field Programmable Gate Array

FSR Fisheye State Routing

GAF Geographical Adaptative Fidelity

GAL Green Abstraction Layer

GSMP General Switch Management Protocol

HQMRP Hierchical QoS Multicast Routing Protocol

IoT Internet of Things

IoT-A Internet of Things Architecture

IP Internet Protocol

IRSCP Intelligent Route Service Control Point

LAM Lightweight Adaptative Multicast

LGT Location Guided Tree

LMR Light-weight Mobile Routing

LRPAN Low Range Personal Networks

LTE Long-Term Evolution

M2M Machine to Machine

MAC Media Access Control

MAODV Multicast Adhoc On-demand Distance Vector

MECN Minimum Energy Communication Network

MPLS-TP MultiProtocol Label Switching-Transport Profile

NFV Network Function Virtualization

NV Network Virtualization

ODMRP On-Demand Multicast Routing Protocol

OLSR Optimized Link State Routing

OPHMR Optimized Polymorphic Hybrid Multicast Routing

OTAP Over The Air Programming

OVSDB Open vSwitch Database

PACDS Power Aware Connected Dominating Set

PAMAS Power Aware MultiAccess with Signalling

PCE Path Computation Element

QoS Quality of Service

RAMP Reliable Adaptative Multicast Protocol

RAN Radio Access Networks

RCP Remote Procedures Calls

RFID Radio Frequency Identification

SANE Secure Architecture for the Networked Enterprise

SD-WANET Software Defined Wireless Adhoc Networks

SDN Software Defined Networks

SDNAN Software Defined Networking in Adhoc Networks

SDSN Software Defined Sensor Network

SMECN Small Minimum Energy Communication Network

SOM Spiral-Fat-Tree On-demand Multicast

SSR Signal Stability-based Adaptive-routing

STEM Sparse Topology Energy Management

TBRPF Topology Dissemination Based on Reverse Path Fowarding

TC Topology Control

TDMA Time Division Multiple Access

TMPO Topology Management by Priority Ordering

TORA Temporally Ordered Routing Algorithm

VANET Vehicular Adhoc Networks

VL Virtual Link

VNE Virtual Network Engine

VWN Virtualizable Wireless Networks

WANET Wireless Adhoc Networks

WLAN Wireless Local Area Networks

WMN Wireless Mesh Networks

WRP Wireless Routing Protocol

WSN Wireless Sensor Networks

XMPP eXtensible Messaging and Presence Protocol

We reject kings, presidents and voting. We believe in rough consensus and running code.

Dave Clark

CAPÍTULO

1

Introducción

El concepto de internet de las cosas (IoT) se ha fortalecido como la base de un sistema que permitirá a las cosas administrar un grado de "inteligencia" en sus interacciones, presentando la posibilidad de dar al mundo un "sistema nervioso artificial" [1]. Por consiguiente, el IoT necesita el soporte y la integración con otros paradigmas, tecnologías, conceptos y leyes que proveerán la robustez necesaria para alcanzar los objetivos esperados de esta tecnología [2].

La IoT, poco a poco, va incorporando en su arquitectura de aplicación a las redes inalámbricas adhoc (WANET). Esta asimilación se debe a la capacidad de las WANETs de ser fácilmente ubicuas, y al mismo tiempo, dotar de un lenguaje de datos a las entidades que entendemos como *cosas físicas*. Las WANETs proveen un enlace eficaz entre una entidad física (una cosa) y los datos en la nube, datos que al procesarlos de una forma específica se convierten en un tipo de conocimiento. Así, las cosas logran acceder a una *inteligencia* por demanda, ya que, la entidad tecnológica WANET habilita la posibilidad de conectar las cosas a la inteligencia entrelazada y global depositada en la nube de acuerdo a un contexto específico que puede estar cambiando en el tiempo.

Si tomamos como ejemplo la representación metafórica del árbol de IoT, se observan tecnologías de redes inalámbricas en las raíces para luego extenderlas a una arquitectura IoT y de esta forma ser capaz de ofrecer servicios como: venta

al detalle, energía inteligente, transporte inteligente, ciudades inteligentes, cuidado personal y logística avanzada. Observamos que actualmente, todavía no existe un consenso o estandarización de uso, por lo que abundan los llamados “silos” y “dominios” muy específicos que no se comunican entre si [3], aunque existen esfuerzos para consolidarlos.

En paralelo a IoT existen otras iniciativas que pueden formar un todo, por ejemplo: cloud services, la movilidad de dispositivos, redes de sensores, técnicas de análisis de datos y virtualización, entre otras [4]. Es probable que cerrando las brechas de la unificación de estas tendencias se logre obtener una arquitectura de aplicación muy eficiente para operar el IoT.

Así, en la unificación de todas estás tendencias e infraestructuras, las WANETs cumplen con un rol clave en la conexión de entidades físicas con entidades virtuales a través de internet, porque las diferentes “cosas” pueden acceder a la inteligencia de la nube a través de sensores, dispositivos, nodos y actuadores administrados dentro de una WANET [5]. Por esta razón, algunos de los esfuerzos de estandarización del entorno IoT consideran a las WANETs en la base de su arquitectura de aplicación. Además, distintos estudios consideran que una tendencia para el futuro será la integración de las redes de sensores inalámbricas (WSN), M2M, RFID, WiFi, ZigBee, 6lowpan y otras tecnologías de red, dentro de IoT.

Las WANETs pueden utilizarse con propósitos de monitoreo en escenarios IoT, rastrear cosas y vigilancia, en ciudades para monitorear flujo del tráfico, condiciones de la carretera, condiciones climáticas, monitorear estructuras de construcción, en el hogar para controlar dispositivos diarios, establecer condiciones de ambientales, en agricultura para monitorear la precisión de aplicación de métodos de incubación y muchas aplicaciones más de los diferentes dominios IoT.

Por lo tanto, debido a su amplio espectro de despliegue, el uso eficiente de los recursos limitados de energía de los nodos de las WANETs es clave para incrementar el tiempo de vida de éstas redes y por consiguiente el avance en los escenarios IoT que soportan.

Este trabajo de investigación propone un algoritmo coordinado para minimizar el consumo de energía en WANETs utilizadas para aplicaciones IoT, mediante el uso del paradigma de redes definidas por software (SDN) y mecanismos de control de topologías (TC). Actualmente, el TC depende del tipo de tecnología que se

utiliza en una WANET, sin embargo, dentro del enfoque SDN, la abstracción de panel de control hace que el TC sea agnóstico del tipo de red, y ofreciendo así una integración más transparente con IoT. n este enfoque los controladores SDN determinan qué nodos son los más útiles para la comunicación y cuáles nodos deberían ser coordinadores en un período determinado de tiempo. De esta forma se presupone que requerirán de menos procesamiento local y de menos mensajes de retransmisión.

Como parte del trabajo de investigación, se ha llevado a cabo el análisis en escenarios de redes WANETs estáticas y móviles, ya que, la tendencia actual en IoT sugiere que aplicaciones estáticas y móviles convivan cada vez más. Esto presenta nuevos retos en los procesos de rendimiento y de encaminamiento, entre otros [6], y consideramos que una solución que presente un buen rendimiento con un enfoque de administración centralizada puede abordar estos nuevos retos de forma factible.

1.1 Motivación

Desde que la mayoría de nodos en redes WANETs basan su fuente de alimentación en baterías o tienen un acceso restringido a ellas, el hecho de minimizar el consumo de energía en WANETs es un desafío clave [7]. El tiempo de vida de las WANETs puede ser definido de muchas formas; en este trabajo, determinamos basar el tiempo de vida de la red en promedios de consumo de energía de sus nodos. Concretamente, el tiempo de vida de la red es el tiempo que se tarda el primer nodo en agotar toda su energía.

Los enfoques actuales para el ahorro energético en redes WANETs están centrados en las diferentes capas del modelo de red específico. Por ejemplo, contamos con enfoques que presentan soluciones a nivel de la capa de física [8], otros abordan el problema energético ejecutando ciertas tareas a nivel de capa MAC (Media Access Control) [9]. Así mismo, algunos consideran la consciencia energética implícita en las reglas de encaminamiento [23] y otros proponen el ahorro energético a nivel de las capas de transporte o aplicación [11].

Con el objetivo de incrementar el tiempo de vida de la red, este trabajo de investigación propone un algoritmo coordinado sensible al consumo energético que optimice su uso mientras mantiene la conectividad de la red, a través de cambios dinámicos en la topología de red. Esto se puede lograr mediante enfoques de infraestructuras de red de tipo “conectar y usar” similar a los servicios que propone el modelo de SDN.

Las redes SDN conforman un modelo de arquitectura emergente que separa los planos de control y de datos de la red. Esta nueva abstracción del plano de control provee una solución para definir y cambiar dinámicamente la topología de la red y su lógica de ruteo. Consecuentemente, estas características podrían conducir a una mejor eficiencia energética a través de la implementación de algoritmos coordinados que usen conceptos de clúster y configuraciones de consumo energético.

WANETs basadas en SDN es una combinación relativamente nueva que introduce la administración centralizada de las tablas de ruteo de los dispositivos de una red. Este modelo de red fue creado para redes de infraestructura estáticas, pero con algunas adaptaciones puede ser usado en entornos distribuidos como las redes WANETs, redes celulares, redes heterogéneas o cualquier tipo de redes de acceso de

radio (RAN). Así, uno o más controladores con la inteligencia de la red centralizada en ellos, construyen una red con la capacidad de realizar cambios en ejecución, directamente programables, en políticas de ruteo, comportamientos y topologías; además, de lograr agilidad en la administración debido a la separación de la abstracción del panel de control.

Este enfoque reduce los costos de administración, sin embargo trae consigo estos otros problemas:

- Cambios en la arquitectura general de una red para aplicaciones IoT y estructura de paquetes de comunicaciones para lograr la separación del plano de datos y el plano de control.

- Criterios para establecer las topologías idóneas en cada momento del tiempo. Además, surgen nuevas abstracciones que se deben administrar como las estructuras internas de los planos en operación, grafos de red, subgrafos, inteligencia de la red, etc.

- Procesos de encaminamiento desde grupo de nodos y nodos individuales hacia la abstracción central que controla la red. Integración de estos procesos con el algoritmo de encaminamiento general del protocolo utilizado.

Por lo tanto, este trabajo de investigación plantea adaptar las WANETs dentro de un entorno SDN, particularmente para gestionar el gasto energético desde la inteligencia de la red. Para lograr tal objetivo, abordaremos las restricciones de los potenciales escenarios y los nuevos problemas expuestos anteriormente. Del mismo modo, nuestra solución debe ser compatible y flexible con la interoperación de multitud de nodos y redes dispares dentro de un marco de un conjunto de normas en común (protocolos y estándares).

Asi, esta tesis aborda estos aspectos claves en está adopción:

- *Simplificar la heterogeneidad de estructuras.* En cuanto a infraestructuras en IoT se interconectan con un amplio número de dispositivos [12], por lo que su administración y rendimiento se vuelven un desafío. Con la solución aquí propuesta se vinculan diferentes tipos de red independientemente del tipo de tecnología que utilicen.

- *Flexibilizar la administración de WANETs.* Las WANETs fueron concebidas para aplicaciones específicas y no para un uso generalizado en diferentes escenarios. Por tanto, al solucionar la rigidez de sus reglas se logra una mayor adopción de las mismas.

- *Obtener una representación básica del conocimiento del estado de red.* Con el enfoque propuesto la red logra crear una cierta capacidad de consciencia energética. Esto es un extraordinario bloque de construcción que puede acoplarse fácilmente a redes que manejan representaciones superiores de conocimiento (por ejemplo, redes cognitivas), y por consiguiente, producir redes mucho más inteligentes.

1.2 Hipótesis

De acuerdo a lo explicado en la sección previa, se plantea la siguiente hipótesis de investigación:

> Si las redes inalámbricas adhoc que soportan el IoT se conciben dentro de un modelo basado en redes definidas por software, se puede abordar la rigidez de sus reglas y las restricciones de su administración, permitiendo una gestión de la topología de red que reduzca su consumo energético y aumente su disponibilidad.

La hipótesis de investigación propone concebir una red adhoc inalámbrica definida por software, con el objetivo de hacer más transparente la administración de sus nodos con internet y optimizar el tiempo de vida de la red en términos de consumo de energía. Para lograr esto, se sugiere proporcionar a las comunicaciones de la red un mecanismo de entendimiento a través del protocolo IP, que es el utilizado para el modelo seleccionado de redes definidas por software.

La idea de introducir el paradigma "definido por software" en las redes WANETs, se debe a que facilita el cambio de políticas de ruteo y monitoreo, y esto permite que la formación de topologías sea más flexible ya que sus procesos de toma de decisiones son administradas desde uno o más controladores y no por los nodos. Así, las técnicas de ahorro de energía mediante el control de topologías de red pasan ha tener sentido dentro de este enfoque.

Una vez diseñado el algoritmo base de conservación de energía se debe desarrollar para que se ejecute en un entorno definido por software. Es decir, el nuevo algoritmo debe utilizar el conocimiento previo y aumentar las operaciones de coordinación, envío de paquetes, modelo de energía para que sean entendidas por un controlador SDN. El modelo propuesto será simulado en ambiente de laboratorio para su análisis y determinar la certeza o falsedad de la hipótesis de investigación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Diseñar un algoritmo que incremente el tiempo de vida de una red inalámbrica adhoc en términos de consumo de energía de sus nodos, siguiendo un modelo de redes definidas por software y mecanismos de control dinámico de tráfico de paquetes.

Para alcanzar el objetivo general se debe abordar los siguientes objetivos más específicos y cuantificables:

1.3.2 Objetivo específicos

- Aumentar la flexibilidad en los mecanismos de control de topologías de las redes inalámbricas adhoc en función de la tasa de tiempo en la que la red acepte comandos externos para cambiar su configuración topológica.

- Proponer un proceso de control de tráfico de datos dentro del entorno de redes inalámbricas definidas por software que mejore la proporción de envío de paquetes sobre el canal de control.

- Comparar enfoques de control de los canales de comunicación de los nodos de redes inalámbricas adhoc en los diferentes escenarios propuestos.

1.4 Metodología de Investigación

La metodología de investigación se ha definido para llevar a capo la comprobación de la hipótesis y objetivos presentados en la secciones 1.2 y 1.3. La estrategia se define a continuación:

Estadio teórico

1. *Identificación de requerimientos y alcance de la arquitectura WANET.* Este estadio pretende desarrollar todos los aspectos relacionados con el marco de referencia, esto es, recolecta la información necesaria para **definir el problema** y construir un estado del arte lo suficientemente consistente como para compilar lo investigado hasta el momento con respecto al campo de arquitecturas IoT, WANET, integración de SDN e integración de servicios de la nube con IoT.

2. *Determinación de indicadores de impacto a evaluar.* Dado el carácter experimental del proyecto de investigación, se incluyen tareas para **realizar una investigación de fondo** para establecer los indicadores que se analizan en los diferentes escenarios de experimentos, sus escalas de medición y umbrales importantes para la investigación.

3. *Establecimiento de variables de entrada y salida.* Esta tarea busca definir las variables que se controlan y las que se observan en los diferentes experimentos para llegar a conclusiones. Se diseñan los análisis de sensibilidad de estas variables y las pruebas de evaluación.

Estadio de diseño

1. *Delimitación de los resultados.* Al mismo tiempo que se establecen las variables de entrada y salida, se estima con que herramientas se desarrollan las primeras versiones del algoritmo central del enfoque a proponer. Todo este análisis se ha llevado a cabo en función de alcanzar los objetivos de la investigación. Se eligen las herramientas y plataformas que devuelvan los resultados buscados y que operen acorde a los indicadores y variables a evaluar.

2. *Identificación de principales actividades técnicas.* Una vez definidos y analizados todos los detalles de las reglas centrales que definen el control del diseño, se definen las actividades a seguir en cada uno de los elementos que se pretende construir y probar. También, se identifican las interfaces entre cada entidad y la forma en que se comunican e integran entre si.

3. *Diseño de red definida por software para la plataforma WANET.* En esta fase se crean todas las consideraciones de diseño para el entendimiento de los protocolos SDN con los protocolos actuales que operan en una WANET y poder **proponer así una posible solución**. En todo el proceso del diseño se toman en cuenta los lineamientos aceptados sobre cómo debe funcionar una arquitectura de aplicación IoT.

4. *Diseño de algoritmo de conservación de energía.* En esta fase se crean todas las consideraciones de diseño para acoplar un algoritmo de conservación de energía dentro del modelo *WANET definida por software (SD-WANET)*. El objetivo final de este planteamiento es comprobar que la autonomía de la red WANET se prolonga en términos de energía con este nuevo enfoque.

Estadio experimental

1. *Puesta en marcha de subprocesos.* Pruebas y ejecución de forma individual de cada subproceso analizado, asi como de todas las interfaces necesarias para la comunicación entre ellos.

2. *Refinamiento de la arquitectura SD-WANET.* En esta fase se integran todos los submódulos resultantes del análisis de flujos de datos, para crear la arquitectura completa que sostiene al algoritmo sugerido y poder **integrar la solución y experimentar**. Se realizan todas las configuraciones necesarias para la comunicación de las diferentes interfaces y ajustes para el correcto funcionamiento de los servicios que se desean obtener.

3. *Pruebas de la arquitectura completa.* Pruebas y ejecución de toda la arquitectura integrada para dar por correctos sus procesos de cálculo y comunicación. En el mismo sentido, las pruebas con la arquitectura completa servirán para

analizar los resultados de los experimentos con el objetivo de determinar su posterior validación

Estadio de validación

1. *Experimentación con la arquitectura completa.* En esta fase se realizan diversos experimentos con la arquitectura de aplicación WANET definida por software sugerida. El objetivo es obtener las conclusiones de comportamiento y la **evidencia suficiente para validar la solución** o el rechazo de hipótesis de investigación (validación a través de simulaciones).

2. *Desarrollo y análisis de sensibilidad de la arquitectura SD-WANET.* La fase final experimenta con la arquitectura completa acoplada a modelos de simulación que sean de un despliegue viable en pruebas de concepto. La idea es medir diferentes variables relacionadas con el consumo energético en diferentes escenarios de red inalámbricas (móviles y estáticos) para contar con datos que nos permitan concluir acerca de comportamientos y los objetivos de nuestra propuesta.

3. *Retroalimentación continua.* Es importante aclarar que en la medida que se avanza en la realización de cada una de las fases del proyecto, éste se va retroalimentando. Así, y a través de la información obtenida de las construcciones de las diferentes capas, es posible que se produzca un **proceso de refinamiento** con acotaciones, reformulaciones o cambios en los procesos del proyecto de investigación, los cuales a su vez, deben ser coherentes con los fines últimos del trabajo de investigación.

Estadio concluyente

1. *Formulación de conclusiones.* Finalmente, a partir de la información recolectada y del análisis realizado de los resultados de los experimentos, se procede a la **presentación de las conclusiones**, discusión de aportaciones y de la alternativa de ahorro de energía en las redes WANETs.

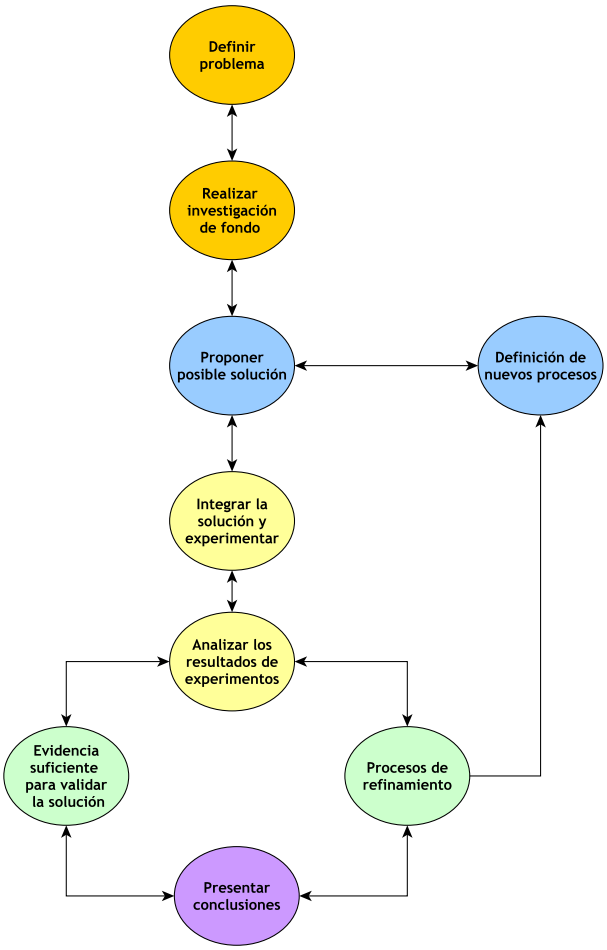


Figura 1.1: Metodología de investigación utilizada.

1.5 Estructura de la Tesis

El resto de esta tesis está estructurada de la forma siguiente:

El capítulo II presenta temas relacionados con la investigación con el objetivo de contextualizar nuestro enfoque. Se recorre desde la idea inicial que es la arquitectura IoT y la posición de nuestro enfoque dentro de esta arquitectura. Posteriormente se aborda el tema de redes programables para inspeccionar el ¿porqué? de la selección de SDN entre otras iniciativas factibles de redes programables. Además, se analizan las diferentes tecnologías que usa SDN para dotar de inteligencia a las redes y situar la tecnología seleccionada en la investigación.

El capítulo III describe el estado del arte de las tecnologías consideradas para integrar las WANETs con IoT y para abordar el problema de consumo de energía en estos escenarios. Las principales técnicas de ahorro de energía en WANETs son presentadas proporcionando un sólido punto de partida para desarrollar nuestra solución. Luego se analizan una serie de discusiones sobre las diversas ventajas y desventajas de los distintos enfoques. Para luego indicar el lugar donde se encuadra la investigación dentro del estado del arte.

El capítulo IV explica la arquitectura general de la solución y describe el algoritmo propuesto. Este capítulo describe como el algoritmo para WANETs se adapta a aplicaciones IoT, así como también su evaluación. También, se explica el diseño de sus partes, las directrices de su operación y los escenarios donde podría funcionar. Además, incluye las consideraciones de encaminamiento del algoritmo y como complementa a las capas estándar de redes inalámbricas.

Luego el capítulo V introduce la implementación del algoritmo en el simulador OMNeT++ y los resultados de los experimentos realizados con escenarios de WANETs estáticas. Se evaluán diferentes escenarios comparando la solución con enfoques de administración distribuidos. En este capítulo también se discute incovenientes descubiertos y el motivo de los mismos. También se explican los diferentes despliegues que se pueden hacer en condiciones estáticas y sus posibles aplicaciones en entornos IoT.

El capítulo VI también presenta resultados de experimentos de implementaciones del algoritmo en ambiente de laboratorio pero considerando escenarios de WA-

NETs móviles. Este capítulo presenta resultados de mediciones hechas con uno o varios controladores. Además, se han considerado múltiples escenarios con diferentes densidades de nodos. También se han analizado las posibilidades de diferentes modelos de movilidad. Adicionalmente, se han evaluado los múltiples escenarios contra un enfoque distribuido presentando las métricas y resultados obtenidos, lo que ha llevado a una discusión de las posibilidades aprendidas, ventajas e incovenientes de cada situación.

Finalmente, el capítulo VII expone las principales conclusiones del presente trabajo, así como remarca las ventajas y limitaciones y discute los objetivos alcanzados. Además, explica las lecciones aprendidas, contribuciones hechas al estado del arte, publicaciones relevantes, y las posibles líneas de investigación futuras que permitirán continuar y mejorar el trabajo desarrollado.

Yo no soy un optimista, tampoco soy un pesimista, soy un posibilista.

Max Lerner

CAPÍTULO

2

Antecedentes

Con el objetivo de clarificar el punto de partida en el cuál se basa está investigación debemos analizar las siguientes iniciativas y tecnologías:

- La arquitectura y servicios IoT.
- Redes inalámbricas para aplicaciones IoT.
- Encaminamiento y topologías de redes para aplicaciones IoT.
- Redes programables para redes más inteligentes.
- Mecanismos para otorgar consciencia energética a redes.

Dichas iniciativas y tecnologías proporcionan el contexto fundamental al cuál está relacionado el trabajo de investigación. Estos conceptos se han analizado desde una perspectiva general que toma aspectos concretos que aporten a la consecución del objetivo descrito en la sección 1.3.

2.1 Arquitectura de IoT

La Internet de las cosas [13], ofrece la posibilidad de dotar al mundo de un "sistemas nervioso artificial"que podamos controlar y del cual obtendremos beneficios para nuestras diversas áreas de relaciones humanas. En este sentido, el concepto de IoT [14] se ha venido fortaleciendo como la base de este sistema que permitirá a las cosas administrar un grado de "inteligencia" en sus interacciones [15].

Para que el IoT sea una realidad, y debido a su gran alcance, se debe apoyar (o integrar) con otros paradigmas, conceptos, tecnologías, leyes e incluso conceptos fundamentales de creencias que le proporcionarán la robustez necesaria para alcanzar los objetivos que se esperan de él [16]. Es aquí donde las diferentes entidades que se conectan a internet desempeñan un papel clave de soporte, ya que las diversas "cosas" pueden acceder a la inteligencia mencionada a través de los sensores, actuadores, redes, dispositivos y algoritmos que son manejados dentro de estas entidades. Es por esta razón que algunos de los esfuerzos de estandarización del ambiente IoT consideran a las WANET en la base de su arquitectura de aplicación [17], así como diversos estudios consideran que la tendencia futura será una integración de WSN, WANET, etiquetas RFID y otras tecnologías de red, todas dentro del mundo IoT.

La metáfora que más se aplica a la idea de IoT es la metáfora del árbol del IoT, Fig. 2.1. En ella se coloca en la raíz las diferentes tecnologías base; como por ejemplo, LTE, WIFI, Bluethooth, RFID, WSN [18]. Luego, el tronco del árbol es representado por un estandar de arquitectura diseñada para entornos IoT. Finalmente,en el follaje se representan los diferentes dominios IoT tales como: energía inteligente, logística, ciudades inteligentes, casas inteligentes, transporte inteligente, cuidado de salud, venta al detalle y servicios personalizados.

El IoT es un término usado para describir la red de dispositivos físicos que pueden sentir y reaccionar a su entorno y comunicarse con usuarios o con otros dispositivos [19].

Así, el IoT plantea establecer a cada *cosa* una entidad virtual mediante la sensorización de información que pueda detectar o inferir [20]. Dichas entidades virtuales utilizarán sensores y actuadores para establecer su comunicación con el mundo

Figura 2.1: Metáfora Árbol del IoT.

real muchas veces a través de redes. La ubicuidad del mundo real con sus correspondientes entidades virtuales definirá las bases de la próxima revolución digital [21].

2.1.1 WANETs dentro del IoT

Con el objetivo de centrar el alcance de este trabajo de investigación hemos llevado a cabo una selección ordenada de las redes que conformarán el IoT. Está taxonomía sirve como punto de partida para aclarar el problema que se plantea en la sección 1.1.

A partir del concepto IoT hacemos la siguiente división de las entidades que lo forman a nivel de red:

En la Figura 2.2 observamos que una primera división muestra aquellas entidades que se conectan de forma directa como *dispositivos autónomos* o por medio de *redes* computacionales. Las *redes* computacionales se agrupan en redes de *infraestructura fija* (las conocidas redes de centros de datos) y redes inalámbricas especializadas *Adhoc*. Estas últimas redes se han visto potenciadas dentro del ámbito

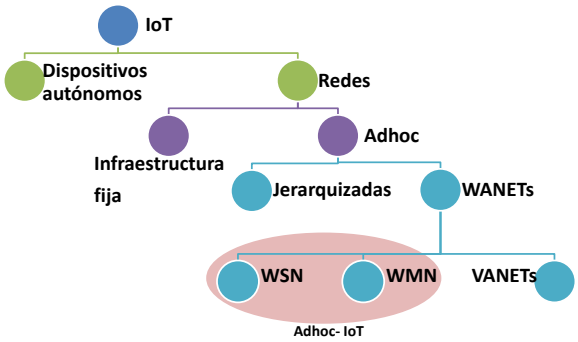


Figura 2.2: Taxonomía propuesta para redes IoT.

IoT, por lo que ha surgido una variedad amplia de dispositivos que conforman una nueva capa de recolección de datos, manejo de información y conocimiento.

El siguiente escalón en la taxonomía lo conforman las redes móviles inalámbricas *jerarquizadas* y las redes móviles inalámbricas adhoc *(WANETs)*. Las redes *jerarquizadas* hacen referencia a las redes inalámbricas tradicionales que siguen un protocolo de comunicación definido en sus capas de red y usan comunicaciones inalámbricas punto a punto dentro de un área limitada; por ejemplo, una red WLAN de puntos inalámbricos fijos(puntos de acceso, estaciones, enrutadores o pasarelas) dentro de un edificio. Por otro lado, se denomina *WANETs* a las redes inalámbricas que cambian su topología de acuerdo a ciertos criterios y ofrecen servicios específicos de información. Cada nodo de una WANET participa en el encaminamiento hacia otros nodos y los nodos son libres de moverse. Esta entidad de red contiene a las *(WSN)* [26], las redes inalámbricas de malla *(WMN)* y las redes vehiculares móviles especializadas *(VANET)*.

En la misma Figura 2.2 se indica la tendencia de integración que se está gestando en WSN y WMN como parte de una base en la arquitectura de aplicación IoT [27] que hemos llamado redes *Adhoc-IoT*. Está integración crece a medida que crece la interoperabilidad de las redes *Adhoc* con el protocolo **IP**, que es el que comunica la mayoría de servicios en la nube conectada de Internet.

En este sentido, los problemas críticos de las WANETs se vuelven igualmente críticos para IoT siendo uno de los más importantes: incrementar el tiempo de vida de las redes. El tiempo de vida de las WANETs puede definirse de distintas maneras, y para la presente investigación definiremos el tiempo de vida de la red en función del consumo de energía de sus nodos. Analizamos el consumo de energía ya que este es un problema común y muy crítico en redes inalámbricas debido a que los nodos generalmente se configuran en entornos con limitado acceso a alimentación eléctrica; además, en escenarios IoT, las WANETs se enfrentan a entornos donde se dificulta la carga energética de sus sensores (por ejemplo ciudades inteligentes [28]); es por esta razón que los algoritmos de ahorro de consumo de energía en estas redes son un área de mejora y continua investigación.

2.2 Iniciativas de Redes Programables

Al mismo tiempo a este desarrollo de Internet, las redes de comunicaciones de centros de datos (fijas e inalámbricas) siguen su propio proceso de evolución. Su objetivo es crear redes computacionales más inteligentes en su administración y uso. Las principales tendencias en busca de esta *inteligencia* son los paradigmas de: *redes definidas por software* (SDN), *redes virtualizables* y *redes cognitivas*, cada una con sus ventajas y desventajas. Estas iniciativas han surgido en el entorno de redes fijas de centros de datos, pero poco a poco se han extendido también a entornos inalámbricos [29].

2.2.1 Administración y Uso Inteligente de las Redes Adhoc

Cada uno de estos interesantes paradigmas mencionados anteriormente puede ser aplicado a las WANETs. Una breve descripción de estas tendencias en su rama inalámbrica se detalla a continuación:

- **Redes inalámbricas virtualizables (VWN):** La idea principal detrás de la virtualización es que permite un mejor soporte de multi-ambiente, multi-proveedor y compartir infraestructura. Se crea una capa llamada “hypervisor”que administra en software el hardware existente de manera global para diferentes ambientes encapsulados de redes. También este paradigma se alinea con la tendencia de computación móvil en la nube abriendo una gama de posibilidades de mejores experiencias a usuarios y ahorros económicos.

- **Redes inalámbricas definidas por software (SDN):** Los beneficios de esta tendencia incluyen el control flexible, el monitoreo en tiempo real, la flexibilidad en el ruteo, el soporte a mejor movilidad y la mejor utilización de recursos. Esta solución está muy aceptada en la comunidad de telecomunicaciones por la verdadera “separación de preocupaciones”que logra en su implementación. Esta separación consiste en separar el plano de datos (*data plane*) del plano de control (*control plane*) depositando toda la inteligencia, y una visión global de la red, en el controlador que se hace cargo del plano de control. Los nodos de enrutamiento solamente se encargan de tareas de reenvío, monitoreo y estado mediante le manejo del plano de datos.

- **Redes inalámbricas cognitivas (CWN):** El objetivo de estas redes es autogestionarse usando representaciones del conocimiento; es decir, tratar de dar a la redes una "cierta consciencia" que les permita tomar decisiones para ser más eficientes de acuerdo a los requerimientos de cada momento. Estas redes también podrían realizar tareas cada vez más complejas descargando este cómputo en la nube y trabajan dentro de un lazo cognitivo que les permitiera pensar, aprender y recordar.

Estos enfoques de redes programables de comunicaciones podrían abordar el problema del consumo de energía de redes WANET en entornos IoT. Nosotros proponemos específicamente el paradigma de *redes definidas por software* para hacer más eficiente el consumo de energía de nodos WANET ya que libera a los nodos de ciertas operaciones mediante el uso de abstracciones en su operación. Además, la "inteligencia" con la que se puede dotar a la red cuando es definida por software es simple (lógica de programación), con mucha robustez y puede acoplarse fácilmente, en el futuro, a un modelo más completo como las redes cognitivas que trabajan con representaciones del conocimiento.

2.2.2 Redes Programables

La búsqueda de inteligencia en las redes, ha conducido al desarrollo de redes programables. Las redes programables habilitan una cierta conciencia de su contexto para tomar decisiones de gestión. Cada una de las tendencias mencionadas en la sub sección anterior, tienen la capacidad de estar conscientes de algunas características de su entorno y podemos dividirlas en arquitecturas fijas e inalámbricas. En nuestro alcance consideramos los despliegues en entornos inalámbricos, por lo que podemos aplicar la tendencia SDN en redes basadas en *redes de área local inalámbricas (WLAN)*, *redes de celulares móviles*, las *WSN* [30] y las *redes de área personal de bajo rango (LRPAN)*.

La tendencia CWN presenta aplicaciones en las *redes basadas en el acceso dinámico del espectro (DSA)* y las que utilizan la *tecnología de la nube*.

Finalmente, la tendencia VWNs se aplica mayormente en *redes basadas en redes de área local inalámbricas (WLAN)*, *redes de celulares móviles*, las redes *basadas en la nube* y la *redes basadas en radios cognitivos (CRNs)*. Así, estas aplica-

ciones representan una variedad de funciones específicas cuyos problemas pueden abordarse para extender el conocimiento en estos entornos. Un resumen, basado en nuestro criterio, de las funcionalidades en las diferentes tendencias mencionadas, se muestra en la Tabla 2.1.

Como podemos apreciar en la Tabla 2.1, cada tendencia habilita algunos servicios y funcionalidades de red mientras carece de otros. En la presente investigación nos enfocamos en abordar la optimización del consumo de energía utilizando el enfoque SDN. Soluciones relacionadas con los demás servicios y funcionalidades de red que quedan fuera de nuestro alcance pueden ser un complemento a nuestro enfoque.

2.2.2.1 Tecnologías y Protocolos de Redes Programables

Para la creación y óptima operación de redes existen cuatro planos generales: el plano de datos, el plano de control, el plano de administración y el plano de servicio.

Plano de datos: Todas las actividades que están relacionadas con el envío de paquetes de datos por el usuario final. Se puede mencionar: el reenvío de paquetes, fragmentación y reemsamble, replicación, unificación de paquetes.

Plano de control: La inteligencia de la red, todas las actividades que son necesarias para que opere el plano de datos. Por ejemplo: construir las tablas de ruteo, configurar las políticas del manejo de paquetes, seguridad, manejo de agentes que anuncian la disponibilidad de servicios, administración de topologías de red.

Plano de administración: Se hace cargo de las actividades que tienen que ver con el monitoreo y aprovisionamiento de las redes. Aquí caben acciones como el monitoreo de procesos, rendimiento, monitoreo de seguridad, fallos, instanciar nuevos dispositivos y protocolos.

Plano de servicio: Son todos aquellos servicios que están orientados a incrementar el rendimiento o seguridad de la red. En este plano se encuentran los balan-

Tendencia	Aplicación	Optimización consumo de energía	QoS	Ruteo y direccionamiento	Detección de errores y corrección	Control de flujo	Alta disponibilidad	Separación de preocupaciones	Administración de topologías de red	Integración con la nube	Direccionamiento IP	Procesamiento en red	Escabilidad	Múltiples ocupantes	Compresión de datos	Unificación de datos	Técnicas de recuperación
SDNs	basadas en WLAN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SDNs	celulares móviles		✓	✓	✓								✓				✓
SDNs	basadas en WSN		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓			✓	✓			✓
SDNs	basadas en LRPAN			✓		✓								✓			✓
CWNs	basadas en DSA	✓															
CWNs	basadas en la nube	✓			✓		✓			✓		✓	✓	✓			✓
VWNs	basadas en WLAN	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓
VWNs	celulares móviles				✓					✓			✓	✓			✓
VWNs	basadas en la nube	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VWNs	basadas en CRN					✓		✓	✓				✓	✓			✓

Tabla 2.1: Tendencias en redes programables

ceadores de carga, detección de intrusos, servicios de proxy, paredes corta fuegos.

Existen muchas tecnologías y protocolos que separan las redes de comunicaciones en un plano de datos y un plano de control (conceptos SDN, agentes de red, técnicas de ruteo), pero es el protocolo Openflow el que está alcanzado gran aceptación tanto en la comunidad científica como en la empresarial. Este protocolo trabaja completamente dentro del entorno SDN y administra el panel de control a través del direccionamiento IP en sus tablas de ruteo; este direccionamiento IP que administra la inteligencia de la red, también hace más transparente la comunicación con el protocolo TCP/IP y por consiguiente con las nuevas tecnologías de Internet (big data, web semántica, nube, etc.).

Adicionalmente, la separación del plano de datos y de control resultan en una abstracción de los nodos de red con respecto a la capa física subyacente, de esta forma la integración de los nodos en cualquier dominio IoT puede ser implementada fácilmente. Por ejemplo, la orquestación de nuevas métricas de encaminamiento que consideren la estabilidad de la ruta o la contención del canal y la interferencia [24] puede ser fácilmente desplegados en el plano de control en tiempos de ejecución de los servicios de red. Además, sistemas distribuidos de monitoreo pueden ser desplegados en sistemas de transporte inteligente (ITSs) [25] donde sus arquitecturas son concebidas desde una perspectiva de capas, y el plano de control puede tomar ventaja de esto para administrar las capas más superiores a través del conocimiento de la red entera.

Existen muchas tecnologías y protocolos que separan la red de comunicaciones en un plano de datos y un plano de control (ya sea con conceptos SDN, agentes ó técnicas de ruteo).

- ANTS: Framework control activo de nodos. El enfoque considera el despliegue de código móvil, cargas por demanda y memoria temporal en encaminadores y nodos finales con el objetivo de cambiar dinámicamente los protocolos de la red [31]. Esta arquitectura concibe la red como un entorno de programación y proporciona un modelo de lenguaje de programación para expresar los comportamientos de la operación de sus entes.

- Switchware: Framework control activo de nodos. Esta tecnología divide a la red en tres capas: paquetes activos, extensiones activas y encaminamiento activo [32]. Los paquetes activos contienen programas que reemplazan a los paquetes tradicionales de red, y al mismo tiempo se complementan con los servicios activos para cambiar dinámicamente la arquitectura y contexto de la red.

- CANEs: Framework control activo de nodos. Este marco de trabajo despliega en la red un sistema operativo de nodos que proporciona la base para que se implementen ambientes de ejecución [33]. Los ambientes de ejecución son los que determinan el comportamiento de control de la red y al mismo tiempo crean aplicaciones activas que facilitan la programación del control de la red.

- Tempest: Open API (Interfaces de programación de aplicaciones por sus siglas en inglés). Este enfoque produce la introducción y modificación de los servicios de red manejando niveles de granularidad [34]. Primero, introduce la capa de arquitecturas de control dentro de las operaciones de la red. Segundo, introduce refinamientos programables de servicios a nivel de capa de aplicación. Así, el conocimiento que se posee de los recursos de la red habilitan la característica de programar la adaptación de las arquitecturas de control.

- GSMP: Pre-SDN. Este enfoque introduce la figura del controlador. El controlador administra los puertos de encaminadores, las conexiones multicast, recursos de los encaminadores y peticiones de configuración de la red [35]. Múltiples encaminadores pueden ser controlados por múltiples controladores, sin embargo, el plano de control no se encuentra totalmente abstraido de la red.

- FoRCES: Pre-SDN. Divide a la red en entidades de operación. Las principales son los FE (Fowarding Element) y los CE (Control Element) [36]. Los FE procesan los paquetes de datos de la red y son dirigidos por los CE. Los CE instruyen como procesar los paquetes de datos y administran la funcionalidad de la red. Esta tecnología incorpora en los procesos de red dos fases: la fase de pre-asociación y la fase de post-asociación. En la fase de pre-asociación

se determina si un FE o un CE deben ser parte del mismo elemento de red. Finalmente, en la fase de post-asociación se determina para cada FE uno o varios CE que lo controlan y viceversa.

- RCP: Pre-SDN. Separa el encaminamiento de los dispositivos encaminadores. Esto lo logra introduciendo una plataforma de control de encaminamiento (RCP) que selecciona las rutas de paquetes en lugar de los encaminadores IP [37]. Los encaminadores IP solamente reenvían paquetes y garantizan la llegada a su destino.

- Softrouter: Pre-SDN. Esta arquitectura tiene el mismo enfoque de ForCES con la diferencia de que las asociaciones entre CE y FE se realizan de forma dinámica [38]; además, todas las funciones del plano de control son implementadas en servidores de propósito general logrando una mayor autonomía entre las tareas de encaminamiento (CE) y reenvío (FE).

- 4D: Pre-SDN. Divide la arquitectura de la red en 4 planos: decisión, diseminación, descubrimiento y datos. El plano de decisión ejecuta todas las decisiones que conducen a la red, es el control de la red. El plano de diseminación conecta los encaminadores con los elementos de decisión a través de una comunicación eficiente y robusta. El plano de descubrimiento es el responsable de identificar lógicamente todos los componentes físicos que entran y salen de la red. Finalmente, el plano de datos maneja los paquetes individuales de datos basado en las salidas del plano de decisión.

- Routing como servicio: Pre-SDN. Consiste en un enfoque flexible de encaminamiento a través de múltiples dominios de encaminamiento [39]. Estos dominios de encaminamiento cuentan con rutas computadas de forma personalizada y ofrecidas *por demanda* por proveedores de terceros. La arquitectura consiste de 3 entidades: la infraestuctura de reenvío que abarca múltiples sistemas autónomos subyacentes, una colección de proveedores de servicios de encaminamiento y los clientes de dichos proveedores.

- Arquitectura PCE: Pre-SDN. Introduce el concepto de elementos de cálculo de rutas [40]. Estos elementos son capaces de calcular rutas de red basados

en el grafo de red y tomando en cuenta las limitaciones computacionales de la red. Los lementos de cálculo de rutas son una aplicación que puede estar localizada dentro de un nodo de la red o en un servidor fuera de la red. Así, los elementos de control pueden coexistir con el enfoque de control distribuido de las redes actuales.

- Cognet: Pre-SDN. Introduce un control y administración global para redes de nodos de radio cognitivas, a través de un grupo de protocolos de código libre [41]. Este grupo de protocolos incluye: un plano de control global, una API para la adaptación de la capa física, protocolos para la coordinación del espectro, autoconfiguración, protocolos para una capa MAC flexible y protocolos para la capa de red.

- IRSCP: Pre-SDN. Esta arquitectura se enfoca en la administración dinámica de la conectividad [42]. Esta manejada por un punto de control inteligente del servicio de encaminamiento. El IRSCP es un elemento lógico y centralizado de encaminamiento, separado de los encaminadores lo cuál permite el control de la selección de rutas en una red.

- SANE: Pre-SDN. Es una arquitectura de protección para redes empresariales [43]. Se define una única capa de protección que gobierna toda la conectividad de la red. Luego, todas las decisiones de acceso de control y de encaminamiento son ejecutadas por esta capa de protección. Dicha capa de protección está alojada lógicamente en servidores centrales que conceden acceso a los servicios de acuerdo a políticas de control de acceso.

- Ethane: Pre-SDN. Es una arquitectura de red para entornos empresariales. Las jerarquías definen una amplia y única política de red muy exhaustiva y detallada que se fuerza a aplicarse directamente [44]. La arquitectura une los switches y encaminadores simples de la red con un controlador central que aplica la política. El controlador concede accesos explícitos habilitando flujos dentro de los switches de la red a lo largo de una ruta elegida.

- Openflow: SDN. Esta tecnología está basada en el switch Ethernet, con una tabla de flujos interna, y un sistema de emparejamiento estandarizado para

agregar y remover entradas de flujo [45]. Las entradas de flujos son controlados por un ente centralizado que tiene la visión global del grafo de red. Divide claramente la arquitectura de la red en un plano de datos y un plano de control. Por esta razón se obtiene una porgramabilidad muy flexible y escalable del comportamiento de la red.

- Active services: Open API. Introduce un marco de trabajo que provee una capa programable sobre la cuál construir servicios de red arbitrarios [46]. Se puede considerar una evolución de las redes activas, pero operando sobre clusteres de agentes de servicio que implementan el servicio deseado. Este enfoque utiliza 6 componentes claves independientes: servicios del ambiente, servicios de locación, servicios de administración, servicios de control, servicios de acoplamiento y servicios de composición.

- Netscript: Open API. Este enfoque concibe la red como una colección de motores virtuales de red (VNE) interconectados por enlaces virtuales (VL) [47]. La colección de VNE y VL define una red virtual Netscript (NVN). Así, agentes Netscript pueden ser programados para procesar flujos de paquetes y configuraciones de los VL. Nodos intermedios de la red son utilizados para el despliegue de las funciones utilizadas por los agentes. Esta tecnología ejecuta especialmente: agentes programables SNMP, analizadores de protocolos, señalamiento y encaminamiento de protocolos.

- Mobiware: Open API. Esta ha arquitectura se centra en la programabilidad de redes móviles [48]. Así, sus elementos se ejecutan en dispositivos móviles, puntos de acceso inalámbricos, switches y encaminadores capaces de moverse. Esta solución opera en la capa de transporte; por lo tanto, un transporte activo inalámbrico suporta transmisiones punto a punto, servicios de datos y un enfoque de QoS adaptativo.

- X-bone: Este enfoque provee una administración y despliegue automatizado de redes superpuestas [49]. Una red superpuesta es una topología virtual mapeada sobre la topología física subyacente. Las principales capacidades que

ofrece este modelo son: un sistema automatizado para un despliegue superpuesto, una forma de interconectar los servidores y encaminadores participantes en la red, nuevas formas de usar la superposición (recursión, revisita, despliegue de servicios, tolerancia a fallos).

- Supranet: Se concibe como un servicio virtual de red sobre los servicios integrados de varios tipos de redes [50]. La principal idea es repartir los recursos de la red entre usuarios o clases de usuarios, esto hace posible que se puedan asociar recursos físicos a una supranet, que alojará esos recursos a sus miembros de forma estática o dinámica.

Diferentes conceptos de redes programables se pueden encontrar en la literatura y campos de investigación. Por ejemplo el *active networking* [51] considera tecnologías como ANTS, Switchware, CANEs, etc. que manejan un enfoque de programar la red a través de paquetes encapsulados con las instrucciones del código particular, originando una especie de lenguaje de red programable que entienden los diferentes nodos. Otro modo de operación en el *active networking* es la utilización directa de switches programables que guíen el comportamiento de la red y que son administrados por canales fuera de banda.

Los enfoques más robustos proponen una separación de planos en la red, pero de manera diferente, por ejemplo: 4D propone una arquitectura de 4 planos: decisión, diseminación, descubrimiento y control; Openflow por otro lado propone separar la red únicamente en 2 planos: el plano de control y el plano de datos. RCP sugiere cambiar el plano de encaminamiento de los ruteadores a una plataforma independiente de control de ruteo. También hay enfoques, como *active services*, que hace uso de agentes de control programables dentro de la red, para administrar los flujos de encaminamiento y propuestas de facilitar el servicio de rutas de la red por demanda. Un resumen, según nuestra investigación, de las principales tecnologías que soportan la arquitectura de redes programables se muestra a continuación en la Tabla 2.2:

Tecnología	Optimización consumo de energía	QoS	Ruteo y direccionamiento	Detección de errores y corrección	Control de flujo	Alta disponibilidad	Separación de preocupaciones	Administración de topologías de red	Integración con la nube	Procesamiento en red	Escabilidad	Múltiples ocupantes	Compresión de datos	Unificación de datos	Técnicas de recuperación	Múltiples arquitecturas de red	Múltiples ambientes de programación
ANTS			✓	✓	✓					✓	✓	✓			✓		
Switchware			✓	✓						✓	✓	✓		✓	✓		
CANEs	✓	✓	✓	✓						✓	✓	✓	✓		✓		
Tempest		✓	✓		✓		✓			✓	✓	✓			✓	✓	
GSMP		✓			✓		✓	✓					✓	✓	✓		
FoRCES		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓			✓	✓	
RCP			✓	✓	✓		✓		✓						✓		✓
Softrouter			✓			✓	✓	✓			✓						
4D		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓					✓	✓	
Routing aaS		✓			✓	✓	✓				✓						
PCE				✓	✓										✓		
Cognet			✓						✓			✓				✓	
IRSCP					✓	✓			✓	✓							
SANE					✓	✓			✓		✓				✓		
Ethane				✓	✓	✓	✓		✓		✓				✓		
Openflow		✓	✓	✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
AS			✓					✓	✓	✓	✓						
Netscript			✓	✓	✓					✓	✓					✓	
Mobiware		✓	✓	✓							✓				✓		
X-bone	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	
Supranet	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	

Tabla 2.2: Tecnologías y protocolos de redes programables

2.3 Redes Definidas por Software

El enfoque SDN propone separar el plano de control del plano de datos (separación de preocupaciones) ubicando toda la lógica de control en un controlador externo. La principal ventaja que se logra con esta separación de preocupaciones es que los nodos de la red se olvidan de tareas complejas y se limitan a emparejar los paquetes entrantes con entradas de flujo en una tabla de flujo y realizar la acción correspondiente [52]. Las tablas de flujo son proporcionadas por el controlador. Esta operación libera a los nodos de gasto de energía, ya que realizan menos procesos internos y necesitan comunicarse menos entre si, y al mismo tiempo se centraliza la inteligencia en el controlador con todas la ventajas y desventajas que se confieren a un sistema centralizado.

Un plano de control administrando la inteligencia centralizada de la red logra una programación eficente de la misma. Para el caso SDN esta administración puede ser pura lógica de un lenguaje de programación (Phyton, C, .Net, Java), de esta forma; se logra el cambio, **en tiempo de ejecución**, de políticas de encaminamiento, comportamientos y topologías debido a que se vuelven directamente programables. Adicionalmente, obtenemos apertura neutral a estándares de diversos proveedores de servicio, ya que todos hablan un lenguaje común. La diferencia recae en la lógica que quiera aplicar cada proveedor.

Finalmente, con este diseño del plano de control centralizado también se obtiene una orquestación centralizada (manejo de miles de dispositivos), escalabilidad dinámica (la red está lista en todo momento para cambiar de tamaño y cantidad), automatización, visibilidad, rendimiento y administración unificada de cómputo, red y almacenamiento [53].

La mayor desventaja de SDN es la que se le atribuye a todo sistema centralizado: un punto de fallo único. Es decir, si falla el ente central, el daño al resto del sistema es catastrófico. Sin embargo existen opciones para mitigar este problema: por ejemplo, es posible configurar múltiples controladores en la red, aunque implica un mayor trabajo de implementación y dependerá de los requerimientos de diseño de la red.

2.3.1 Implementaciones SDN

Openflow fue creado para redes de infraestructura (centros de datos), sin embargo, debido a su flexiblidad y rendimiento, su despliegue en otro tipo de redes se ha llevado a cabo desde hace tiempo. SDNAN [54] sigue la lógica de aplicación Openflow para obtener la separación del plano de control en redes de teléfonos inteligentes Adhoc. Sensor Openflow [55] y redes de sensores definidas por software (SDSN) [56] muestran que es posible activar el protocolo en redes de sensores inalámbricas. La virtualización de IoT con el objetivo de compartir recursos del flujo de sensores y la infraestructura física de redes inalámbricas ha sido abordada en [57] y OpenADN [58]. También existen implementaciones de Openflow en WMN móviles y estáticas [59]. Nuestro enfoque usa la arquitectura de Sensor Openflow para implementar el algoritmo propuesto. Las razones de seleccionar Openflow como la tecnología a examinar para alcanzar la separación de los planos de una red inalámbrica se exponen a continuación: Openflow utiliza el direccionamiento IP para su operación, separa el plano de control y el plano de datos por emparejamiento de direcciones IP al nivel de las tablas de encaminamiento. Este emparejamiento IP se realiza en el controlador (plano de control), y una vez la acción a ejecutar es decidida, el controlador libera las instrucciones a los nodos afectados en el plano de datos. Los nodos todavía tienen algunas tablas de flujo e instrucciones, sin embargo, no ejecutan procesos de decisión sobre estas tablas o configuración de acciones, ellos solamente corren procesos de comunicación.

Las comunicaciones IP son requeridas en el protocolo Openflow. No hay problemas en nodos que soportan IP. Por otro lado, en nodos limitados de servicios, estas comunicaciones pueden se programadas. Los nodos limitados pueden utilizar un sistema operativo que provea estos servicios, como Contiki, o implementar campos especializados en la cabecera de paquetes, para que sean reconocibles por el protocolo IP; por ejemplo, el funcionamiento de los nodos en Sensor Openflow.

Así, el protocolo Openflow mejora la definición y el cambio de topologías de red, lo que hace más fácil la integración de nuestro algoritmo con las técnicas de control de topologías para alcanzar nuestros objetivos de ahorro energético.

Una técnica de control de topología es desplegado por encima de la capa MAC abstrayendo el control de encaminamiento para optimizar su disponibilidad en

términos del tiempo de vida energético. Este enfoque habilita extensiones plug and play con otras capas de red, y además proporciona una arquitectura que puede extender su conectividad hacia protocolos basados en encaminamiento jerárquico o cluster que consideran un uso de energía confiable [60].

Adicionalmente, diversos enfoques ofrecen una limitada separación de preocupaciones entre las tareas de red; como resultado, estos enfoques lidian con una baja capacidad para administrar entornos heterogéneos desde una perspectiva de conservación energética. Además, existen dificultades para construir una orquestación de los niveles de capa de red para alcanzar comunicaciones cooperativas. Así, es beneficioso dotar a las estructuras de red la capacidad de combinar la "conciencia energética" con la programabilidad eficiente de la red [61] y el control de flujos tal como lo hace SDN. Openflow ejecuta estas funciones de una manera liviana en el uso de recursos y eficiente para términos de disponibilidad de servicios de red.

2.4 Protocolos SDN

Existen muchas propuestas que proponen una separación entre las actividades de administración de datos y la administración de control. A continuación resumimos los principales enfoques. Posteriormente exponemos los motivos por los que consideramos que Openflow es la tecnología que mejor se acopla a nuestro trabajo de investigación dentro de la visión SDN.

2.4.1 Openflow

Este protocolo trabaja plenamente dentro del enfoque SDN y administra el panel de control mediante el direccionamiento IP de las tablas de encaminamiento que confeccionan la red de datos a través de controladores SDN. Es importante resaltar que, este direccionamiento IP que administra la inteligencia de la red hace más transparente la comunicación con el protocolo TCP/IP; y por consiguiente, con Internet y sus servicios en crecimiento (Big data, web semántica, computación en la nube, etc). Así, los proveedores de Internet logran que la infraestructura del nuevo mundo IoT sea más agnóstica a sus códigos fuentes de servicios y administración abriendo un abanico de posibilidades de uso y ahorro de costos para el nuevo "sistema nervioso"de miles de nodos (cosas) conectadas a Internet.

2.4.2 BGP

BGP por sus siglas en inglés de Border Gateway Protocol [62], es un protocolo de encaminamiento que introduce cierta autonomía en su sistema. La idea central es construir un sistema BGP capaz de comunicarse con otros sistemas BGP para intercambiar información de accesibilidad de la red. Esta información de accesibilidad de la red consta de diversas listas de rutas de grupos de nodos que al comunicarse pueden crear un grafo de conectividad de sistemas autonomos (ASes) de la red completa. Así, una entidad de control de la red puede abordar este conocimiento para depurar bucles de encaminamiento ineficientes o forzar políticas de decisión de acuerdo a parámetros deseados.

2.4.3 NETCONF

Este protocolo se basa en recuperar información de configuración del funcionamiento de los dipositivos de una red para luego cargar nueva información de configuración y manipularla [63]. El protocolo construye diferentes API para enviar y recibir los grupos de datos de configuración. NETCONF abstrae el control en un servidor que utiliza el enfoque de llamada remota de procedimiento (RPC) para comunicarse con los dispositivos clientes. La sesión cliente-servidor intercambia las RPC utilizando el formato XML. También, el protocolo incorpora para cada tipo de dispositivo un grupo de *capacidades* que extienden la programabilidad de los comportamientos del sistema. Así, a través de sus *capacidades*, el sistema se adapta a las necesidades de la red en configuraciones de topologías, enlaces, políticas, clientes y servicios. Además, con esta conceptualización de administración del control de la red se logra una separación de configuraciones y una separación de estados de datos que reduce los problemas de comunicación.

2.4.4 OVSDB

Es un protocolo de gestión de base de datos basado en un software llamado open vSwitch [64]. Este software está diseñado para reenviar tráfico en ambientes virtuales, por lo que comunica diferentes máquinas virtuales ya sea en un mismo servidor o con la red física. El vSwitch es también un software de código abierto y usa Openflow para abstraer el control de la red. La administración de OVSDB utiliza el formato JSON. La intención es dotar de programabilidad los switches virtuales que construyen el encaminamiento de la red. Para esto, vSwitch utiliza un clúster de control y administración que es el que se encarga de las configuraciones de operación entre un servidor OVSDB y sus switches correspondientes. Algunas de las funcionalidades que pueden soportarse con este enfoque son: creación, modificación y borrado de rutas de datos Openflow, configuración de grupos de controladores y administradores de rutas, creación, modificación y borrado de puertos para las diferentes rutas e interfaces de túneles que usa Openflow, mantenimiento de consultas, configuración de calidad de servicio y recolección de estadísticas.

2.4.5 XMPP

Protocolo de presencia y mensajería extensible [65]. Este protocolo intercambia en tiempo real datos estructurados en formato XML para definir los métodos claves del protocolo, como por ejemplo: la configuración y abandono de los flujos XML, encriptación del canal, autenticación, manejo de errores, primitivas de comunicación de mensajes, disponibilidad de la red y las interacciones de solicitud-respuesta. Para el intercambio de estructuras XML el protocolo hace uso de una arquitectura distribuida cliente-servidor. Es posible también que un servidor se conecte con otro servidor dentro de la red con el objetivo de habilitar las comunicaciones entre dominios. La comunicación en el protocolo de los flujos de datos se dá en forma asíncrona. Algunas de las funcionalidades de este protocolo son: el uso de direcciones globales únicas para las entidades de la red, la habilidad de anunciar la presencia de cada entidad que entra a la red, comunicaciones persistentes cliente-servidor y viceversa, comunicación punto a punto con datos estructurados y creación de una red distribuida de clientes y servidores.

2.4.6 MPLS-TP

La idea de este protocolo es dotar la tecnología MPLS, usando un perfil de transporte MPLS, con herramientas que extiendan las capacidades de operación, administración y mantenimiento [66]. Así, este protocolo potencia los requerimientos de la capa de transporte de red tales como: la escalabilidad, la habilidad de soportar cualquier tipo de tráfico entre los clientes de la red, la calidad de los servicios, y el balance coste y eficiencia. Las características principales del funcionamiento de MPLS-TP son: es estrictamente orientado a conexión, puede soportar servicios L1, L2, L3, es agnóstico a la capa física, las capacidades de operación, administración y mantenimiento operan en el plano de datos del protocolo y son independientes del plano de control, proporciona esquemas de protección para el plano de datos, es capaz de centralizar o distribuir el plano de control y el plano de control es capaz de comunicarse con diversos esquemas de administración y control de redes con múltiples capas de transporte.

2.4.7 Discusión

Existen diversos esquemas SDN para desplegar en redes fijas e inalámbricas, cada uno con sus particulares herramientas, procesos y librerías de compatibilidades. Los puntos fuertes por los que se considera la tecnología Openflow una opción fiable y robusta para mejorar la administración de redes Adhoc y su interoperabilidad IP son:

- Como se mencionó anteriormente, permite una separación de preocupaciones al separar el plano de control del plano de datos esto abre la posibilidad de integrar la red a las arquitecturas abiertas al internet.

- Para los futuros escenarios IoT con redes Adhoc en su base, se flexibilizan las políticas de conformación de topologías de red, modos de operación y encaminamiento; ya que su administración se vuelve agnóstica en relación con el dominio IoT.

- Es posible cambiar las topologías de operación de red de acuerdo a patrones del usuario, movilidad del usuario y características de carga de infraestructura, esto se logra con la lógica de un lenguaje de programación.

- Esfuerzos por la creación de planos de datos abiertos y estandarizados (OpenADN) que permitan a cualquier proveedor de internet aplicar su manejo de políticas de tráfico.

- Para el caso específico de las redes inalámbricas de sensores [67], existen iniciativas como Sensor Openflow que permite cambios de políticas con un estilo fácil, ya que un programador puede simplificar los cambios en el software de controladores de la red, en vez de tratar directamente con los sensores inalámbricos.

- Lo nodos no son dependientes de una aplicación y las políticas de consulta de datos de los nodos pueden ser fácilmente reiniciadas [68].

- La tecnología Openflow se adapta a ambientes rurales, por la separación de preocupaciones que permite ser más eficiente en los dispositivos de primera

Tecnología	Modos de operación por demanda	Soporte lenguajes programación	Plano de datos abiertos	No dependencia a aplicaciones	Adaptación inteligencia-red/dominios IoT
BGP	✓	✓			
NETCONF	✓				✓
OVSDB	✓		✓		✓
Openflow	✓	✓	✓	✓	✓
XMPP					✓
MPLS-TP	✓	✓			✓

Tabla 2.3: Comparación protocolos SDN de redes

línea, ya que estos no tienen la inteligencia de la red y se pierde menos al exponerlos a ambientes hostiles.

La tabla 2.3 presenta las diferencias entre las características más importantes de los protocolos SDN evaluados.

Es evidente que la tecnología Openflow es la que mejor cubre las brechas entre la integración WANETs con IoT. Por consiguiente, nuestro enfoque usa la tecnología Openflow para desplegar técnicas de ahorro de energía en las redes inalámbricas Adhoc. Adicionalemnte, la abstracción de control es independiente de las tecnologías que operan en la red subyacente. Así, las técnicas de ahorro de energía especializadas para un modelo específico se vuelven también agnósticas a la red subyacente. Por lo tanto, se abre la posibilidad de experimentar con las eficientes técnicas energéticas de control de topologías en el nivel de abstracción de red que se asemeja a los futuros dominios IoT.

Te agradezco tu atracción a mi inteligencia, pero ten en cuenta, que es artificial.

Cortana

CAPÍTULO

3

Estado del Arte

Después de centrar los temas generales sobre los cuáles se basa este trabajo de investigación, analizamos ahora la literatura y propuestas que tienen relación cercana con cómo abordar los problemas relacionados con el consumo energético en redes utilizando el entorno SDN. Esta investigación se enfoca en proponer una solución de funcionamiento que mantenga la disponibilidad de una WANET en términos de consumo energético. Por lo tanto, la revisión bibliográfica se presenta dividida en dos temas principales: eficiencia energética por SDN y eficiencia energética en redes homogéneas-heterogéneas. El resultado de la revisión bibliográfica presenta un contexto que permite comprender las principales carácteristiscas de estas soluciones.

También, como se menciona en [69] analizaremos donde se ubica SDN en el estado del arte como alternativa eficiente para abordar los nuevos retos del nuevo ambiente interconectado que lidera el crecimiento de los servicios y aplicaciones informáticas.

En primer lugar, exploramos las soluciones más representativas de la literatura para abordar la disponibilidad, en términos energéticos, de las redes inalámbricas. Examinamos el caso de la restricción de energía en redes inalámbricas homogéneas y heterogéneas. Además, esta propuesta se destaca en la novedad que se centra en el tipo de redes inalámbricas heterogéneas.

Finalmente, resumimos los diversos enfoques y discutimos sus aportes, ventajas, desventajas y definimos las razones por las que creemos que nuestra aproximación es adecuada en este contexto.

3.1 Técnicas para la eficiencia energética de redes inalámbricas

Existen muchas formas de obtener una red consciente de la energía. Los enfoques tradicionales se han concebido desde una visión aislada por cada capa de red. Sin embargo, la conectividad ubicua que se avecina con *entornos inteligentes*, redes urbanas y redes heterógeneas producirá una explosión de escenarios con diversos dispositivos de distintas tecnologías, modelos de funcionamiento y servicios [70]. Por lo tanto, analizaremos los enfoques que se despliegan en capas individuales de un modelo red para luego centrarnos en aquellos enfoques que utilizan SDN como parte de su marco de ejecución.

Los siguientes apartados presentan las propuestas actuales para administrar la eficiencia energética en redes inalámbricas. Dichas propuestas se conciben desde capas distribuidas del modelo de red; por lo tanto, la eficiencia energética se controla desde: mecanismos de encaminamiento, protocolos capa MAC, capa de aplicación y gestión de topologías. Después, se presentan los enfoques actuales utilizados desde la perspectiva SDN para lograr eficiencia energética. Estos consideran: la aplicación directa de algoritmos definidos por software al tráfico de red, virtualización de entidades de red, control de topologías, manejo del espectro electromagnético y administración de grafos de red. Despueś, se describen las soluciones actuales que combinan los enfoques anteriores en redes inalámbricas homogéneas y heterogéneas i.e. redes que utilizan las mismas o distintas tecnologías de red entre sus capas. Finalmente, se discuten las conclusiones relacionadas al porqué las soluciones expuestas no son la opción más eficiente para cubrir los objetivos de esta investigación.

3.1.1 Eficiencia Energética por Capas Distribuidas de Redes Inalámbricas

Actualmente la eficiencia energética en redes inalámbricas se concibe dentro de las capas del modelo de red correspondiente. Así, tenemos propuestas que analizan cómo ahorrar energía a nivel de capa física, capa MAC, capa de encaminamiento, capa de aplicación, etc. Existen algunos enfoques que mezclan varias capas, aunque

actualmente son rígidos y aislados y sólo pueden aplicarse bajo ciertas condiciones. Por ejemplo, redes que no son capaces de cambiar sus mecanismos de encaminamiento por demanda o redes que solamente reconocen un protocolo de servicios.

La mayoría de propuestas se centran en la capa MAC y de encaminamiento ya que están relacionadas directamente con las transmisiones de paquetes. Cada tipo de red ejecuta sus propios protocolos de comunicación y cálculos entre las diversas tecnologías y estándares desplegados en sus capas de red interiores. Este funcionamiento dificulta aplicar estrategias ubicuas de procesamiento en un tipo de red específico.

La tendencia futura es alcanzar eficiencias energéticas en redes móviles que cambian sus estados entre una administración por capa y una administración integrada de multicapa de red e.g. las redes 5G desplegadas en entornos móviles integrados con servicios en la nube [71].

3.1.1.1 Mecanismos de Encaminamiento

La lógica de encaminamiento o ruteo se puede configurar de forma personalizada en cualquier momento dentro de la red. Existen mecanismos de encaminamiento con diferentes alcances, por lo que el esquema de encaminamiento que utilice dependerá de los objetivos de los requerimientos de la red.

Por ejemplo, los algoritmos DSDV [72], OLSR [73] o TBRPF [74] basan su despliegue en el manejo de tablas de encaminamiento e información permanente en estructuras internas; en cambio, algoritmos como AODV [75], DSR [76] o TORA [77] manejan un enfoque por demanda creando las diferentes rutas solamente cuando son requeridas.

También, al integrar visiones de planos de red independientes como la visión SDN, es posible combinar diferentes protocolos de encaminamiento. Así, soluciones híbridas como la presentada en [78] usan encaminamiento consciente del gasto energético integrado con encaminamiento basado en el estado de enlaces. Un agente de red se hace cargo de las tareas de encaminamiento y un segundo agente de red se encarga del control SDN. De esta forma se construyen y mantienen tablas híbridas que siguen parámetros de encaminamiento, que cambian dinámicamente, con el objetivo de ahorrar energía en la red. Nuestro enfoque busca extender las capacidades de la red de una forma similar, la diferencia es que al hacer uso de

topologías de control también se explotan las capacidades del nuevo conocimiento almacenado en el plano de control.

Adicionalmente, los enfoques más utilizados dentro de los algoritmos de encaminamiento son aquellos que soportan comunicaciones *unicast* y los que soportan comunicaciones *multicast*. En ambos enfoques podemos encontrar algortimos orientados a la eficiencia energética.

3.1.1.2 **Algoritmos Unicast**

Entre el universo de redes WANETs se encuentran las WMNs. Estas redes proporcionan una línea base en su capa de encaminamiento interesante para acoplarse al modelo definido por software. Los algoritmos unicast de estas redes se pueden dividir en **algoritmos orientados a tablas**, como por ejemplo:

- **CGSR:** *Clusterhead Gateway Switch Routing* [79]. Encamina paquetes alternando entre nodos *clusterheads* y nodos *gateways*. Dentro de las redes móviles inalámbricas un grupo de nodos formando un clúster es un enfoque eficiente para el desarrollo de funciones importantes como acceso al canal, encaminamiento y asignación de ancho de banda. Un nodo es elegido como *clusterhead*, luego todos los nodos dentro de su rango de transmisión pertenecen a este clúster. Un nodo *gateway* es aquel que pertenece a más de un clúster.

- **WRP:** *Wireless Routing Protocol* [80]. Este protocolo define que los nodos comuniquen la distancia y los dos últimos saltos para cada destino. Cada ndo mantiene una tabla de distancia, una tabla de encaminamiento, una tabla de coste del enlace y una lista de retransmisión de mensajes.

- **FSR:** *Fisheye State Routing* [81]. En encaminanimiento, el enfoque *fisheye* significa mantener información exacta de distancias y calidad de rutas acerca del vecindario inmediato de un nodo. FSR introduce una noción de alcance multi-nivel *fisheye* donde la información intercambiada de estados depende de una frecuencia, distancia y destinos.

y **algoritmos iniciados por demanda**, como por ejemplo:

- **LMR:** [82]. Este enfoque se adapta de forma asíncrona a los cambios arbitrarios en la topología y con ausencia del conocimiento de la topología global de la red. El protocolo es "orientado a destinoza que versiones separadas del algoritmo corren independientemente para cada destino de la red.

- **ABR:** *Associativity-Based Routing* [83]. Este protocolo sugiere emplear un nuevo esquema de encaminamiento basado en la asociatividad. Una ruta se selecciona de acuerdo a nodos que tienen estados de asociatividad que implican períodos de estabilidad. El enfoque presenta capacidades para configurar la calidad de las rutas, interoperabilidad con redes cableadas e integración con tecnologías de la nube.

- **SSR:** *Signal Stability Routing* [84]. Este enfoque combina potencia de la señal con estabilidad de localidad. También, este enfoque combina algoritmos de encaminamiento estático y dinámico de acuerdo a las necesidades de la red.

De ambos enfoques, los algoritmos orientados a tablas son los más adecuados para adaptarse al protocolo Openflow, debido a su diseño en base a tablas de encaminamiento. Una clasificación de los protocolos de encaminamiento unicast en WMNs es la siguiente:

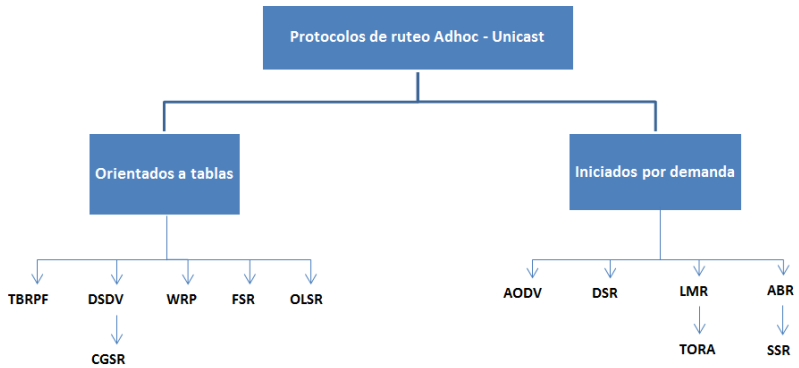


Figura 3.1: Taxonomía protocolos UNICAST.

Estos enfoques unicast son rápidos de implementar con un grado de eficiencia aceptable según los propósitos de los servicios de red. No obstante, son rígidos

al tipo de red donde se despliegan y no muestran flexibilidad para combinarse. Al introducir SDN, el control central de red se vuelve capaz de cruzar estos algoritmos de acuerdo a los requerimientos de la red en determinados períodos de tiempo.

3.1.1.3 Algoritmos Multicast

Los protocolos multicast también son muy usados en el ámbito de las WANETs, entre estos podemos mencionar los más comunes:

- **AMRIS:** *Adhoc Multicast Routing using Increasing id-NumberS* [85]. El enfoque propone asignar a cada nodo dinámicamente y por demanda en una sesión multicast con un número *id*. Las sesiones multicast son gestionadas por árboles de envío creados alrededor de un nodo especial llamado *Sid*. La relación entre los demás números de *id* y *Sid* (y los nodos asociados a ellos) es que los números de *id* incrementan su valor númerico a medida ellos radian sobre *Sid* en el árbol de envío. Además, AMRIS es capaz de reparar localmente un sector del árbol de envíos y así ahorrar energía.

- **MAODV:** *Multicast Adhoc On-Demand Distance Vector* [10]. Este protocolo ofrece una adaptación del protocolo AODV para las condiciones de los enlaces dinámicos, bajo procesamiento, sobrecarga de memoria, y baja utilización de red. Además, MAODV soporta el multicast y emisión. También, MAODV puede ser extendido para soportar calidad de servicio (QoS).

- **AMROUTE:** *Adhoc Multicast Routing Protocol* [86]. Explota las capacidades de estrategias de árboles de usuarios multicast y núcleos lógicos dinámicos. Túneles unicast son usados como los enlaces de árbol para conectar vecinos sobre el árbol de usuarios multicast. También, los núcleos pueden migrar dinámicamente entre los nodos miembros. Este protocolo opera con los componentes de la creación de árboles y la creación de mallas.

- **LAM:** *Lightweight Adaptative Multicast* [87]. Está diseñado para WANETs móviles. Además, es un protocolo que no requiere mensajería basada en el tiempo y usa una estrategia basada en árbol. LAM construye un árbol multicast de encaminamiento con grupos compartidos para cada grupo multicast.

Este árbol se centra en un nodo preseleccionado llamado núcleo. Los puntos fuertes de este protocolo son: escalabilidad, adaptabilidad, livianidad y simplicidad.

- **ODMRP:** *On-Demand Multicast Routing Protocol* [88]. Es un protocolo basado en la estrategia de malla. Además, soporta un esquema multicast y utiliza el concepto de grupos de reenvío. ODMRP tiene un buen rendimiento en WANETs con servidores móviles donde el ancho de banda es limitado, la topología cambia rápida y frecuentemente y la energía es limitada.

- **CAMP:** *Core-Assisted Mesh Protocol* [89]. Funciona con una estrategia basada en malla. Una malla multicast compartida es definida para cada grupo con el objetivo de mantener la conectividad de los grupos multicast incluso cuando los encaminadores de la red se muevan frecuentemente. Dentro de la malla multicast de un grupo, los paquetes de cualquier fuente en el grupo son reenviados a lo largo del reverso del camino más corto hacia la fuente. CAMP tiene una eficiente escalabilidad porque no requiere fuentes o destinatarios para inundar la red completa de paquetes de control o datos.

- **LGT:** *Location Guided Tree* [90]. Este enfoque utiliza algortimos de árboles de paquetes distribuidos para el envío de datos. El objetivo principal en el proceso de construcción del árbol es minimizar el costo de ancho de banda total del árbol. Se utilizan las localizaciones geométricas de los nodos destinos para calcular los árboles. Además, existe un mecanismo de diseminación de la información de localización entre los grupos de nodos.

- **DDM:** *Differential Destination Multicast* [91]. Le da a los nodos fuentes del multicast un conocimiento de las credenciales de los grupos; de esta forma, concentra la autoridad sobre grupos en las fuentes de datos. Además, cada nodo independientemente tiene la opción de capturar estados de reenvío, en vez de que los estados de reenvío multicast sean almacenados en todos los nodos participantes. Así, este protocolo tiene un excelente rendimiento en redes dinámicas de cualquier tamaño que utilicen grupos multicast pequeños.

- **HQMRP:** *Hierarchical QoS Multicast Routing Protocol* [92]. Protocolo de encaminamiento multicast basado en jerarquías QoS. HQMRP provee rutas sensibles a QoS en una forma escalable y flexible en un ambiente de red con movilidad. Cada nodo local solamente necesita mantener información de encaminamiento multicast local o información resumen de otros dominios, pero no requiere ningún otro estado global de la red Adhoc para ser mantenido.

- **SOM:** *Spiral-Fat-Tree On Demand Multicast* [93]. Se basa en 2 estrategias principales, estas son: la estrategias basadas en árboles y las estrategias basadas en malla. El protocolo construye un *spiral-fat-tree* como su árbol multicast. El *spiral-fat-tree* es una variación del algoritmo convencional *fat-tree*. SOM logra un buen desarrollo de las fases de búsqueda-multicast, respuesta-multicast y mantenimiento del árbol multicast.

- **RAMP:** *Reliable Adaptive Multicast Protocol* [94]. Un protocolo adaptativo multicast seguro que opera sobre la capa de red. Este protocolo provee un método estándar para una transmisión segura punto-a-multipunto. Algunas funciones de este protocolo son: notificaciones oportunas de fallos del destinatario hacia el remitente; así como, del remitente a todos los destinatarios, rápida entrada y salida a grupos en cualquier punto de la sesión, y soporte a transporte inseguro y seguro en algunos de los remitentes.

- **CQMP:** *Consolidated Query-packet Multicast Protocol* [95]. La fortaleza de este protocolo es reducir la sobrecarga de control cuando hay presencia de múltiples fuentes. Es un protocolo por demanda basado en la estrategia de malla. CQMP presenta un algoritmo que consolida todas las consultas de unión a un grupo multicast en un intento de reducir el número total de transmisiones de consultas de los nodos.

- **OPHMR:** *Optimized Polymorphic Hybrid Multicast Routing* [96]. Este protocolo polimórfico intenta beneficiarse del alto rendimiento del comportamiento proactivo y la sobrecarga de tráfico limitado de red. Además considera ser consciente en energía, movilidad y densidad de vecinos.

Todas estas opciones aisladas en su comportamiento benefician y penalizan a la red de acuerdo a sus características particulares. Actualmente, dichas opciones no cuentan con la capacidad de aplicar sus servicios bajo demanda de su respectivo contexto. No obstante, al agregar una nueva capa de abstracción de conocimiento a su control se habilita la posibilidad de concebir comportamientos basados en dichas características particulares por demanda, para nuestro caso, de acuerdo a parámetros relacionados con la prolongación del tiempo de vida de la red.

3.1.1.4 Capa MAC

En la literatura encontramos enfoques que se centran en la capa MAC de las WANETs para alcanzar un grado de ahorro de energía a ese nivel de capa de red. En [97] es posible consultar cómo la capas del modelo general de red inalámbrica intervienen en las consideraciones del diseño de una red para abordar la eficiencia energética. Específicamente, en la capa MAC, la idea principal es minimizar las colisiones a ese nivel de capa, ya que resultan en indeseadas retransmisiones. Así, se examina como protocolos de la capa MAC como IEEE 802.11, EC-MAC y PAMAS están orientados, desde su diseño, a la conservación de energía. No obstante, los servicios inalámbricos continuarán creciendo y haciéndose más sofisticados, por lo que los objetivos de eficiencia energética deben concebirse con mayores relaciones entre las diferentes capas de la pila de protocolos inalámbricos, lo cuál con los enfoques actuales es complicado porque no existe comunicación entre estrategias de capas de red.

En [98] se presenta un protocolo a nivel de capa MAC que a través de TDMA da a nodos de sensores inalámbricos una comunicación bastante libre de colisiones. La idea principal es minimizar la sobrecarga de la capa física en el pre-ámbulo de las transmisiones. Además, la operación de este protocolo no depende de un administrador central o estaciones base. Adicionalmente, los nodos no necesitan el uso de mecanismos *handshaking* antes de un intercambio de datos.

En el mismo sentido, en [9] se establece evitar las fuentes de mayores costos energéticos a nivel de capa MAC: colisiones y sobrecarga de paquetes. DEMAC separa a los nodos entre nodos críticos y nodos débiles estableciendo una mayor actividad a los críticos dentro de la red. Este es un enfoque distribuido y se basa de

TDMA. No se necesita un mecanismo de tratamiento de la colisión de paquetes ya que los espacios de transmisión son asignados previamente en los nodos.

A pesar de que estos enfoques proporcionan un grado de conciencia energética en un modelo de red muestran las limitaciones de no tener la capacidad de interactuar con las capas superiores. Además, por estar la capa MAC relacionada directamente con la capa física estas opciones se vuelven fijas al tipo de tecnología de hardware utilizada.

3.1.1.5 **Capa de Aplicación**

Una de las capas con más posibilidades para tener una visión amplia de la red es la capa de aplicación. Esta capa logra una cierta penetración en el comportamiento de las capas inferiores que le permite un despliegue de eficiencia energética con un grado mayor de integración y portabilidad entre redes.

Observamos en [8] que los autores proponen una plataforma con un diseño modular a nivel de capa de aplicación y física basado en programación orientada a objetos. El software modular incluye clases y objetos especializados para: asignación de tareas de red, control de sensores, seguridad, temporizadores, calidad de encaminamiento, protocolos de usuarios, inundación de mensajes y programación sobre la ejecución. Como resultado es posible crear instancias personalizadas, y adaptadas de hardware y de software que comprenden la funcionalidad exacta requerida para una aplicación particular.

Otros autores proponen en [11] una herramienta automática, a nivel de capa de aplicación, que guía las decisiones de operación de la red en consecuencia a una esquematización del uso de energía de varios recursos, que se ha construido previamente. La herramienta consiste de 3 componentes principales: un esquematizador de uso de energía, un administrador del flujo de trabajo y un registrador de eventos. La idea es actuar en la red de acuerdo a la interdependencia de carga de trabajo, rendimiento y energía.

Es interesante como las visiones de eficiencia energética, a nivel de aplicación, pueden alcanzar una cierta interacción a través de las capas inferiores de un modelo de red; sin embargo, esta cierta interacción no construye un conocimiento que permita abstraer el control completo de la red para lograr una administración consolidada a todos los niveles de capas.

3.1.1.6 Gestión de Topologías y Subgrafos de Redes

Como mencionamos en la sub sección 3.1.1.4 una de las formas de habilitar la conciencia energética en redes inalámbricas es actuar sobre el control de la capa de red, configurando topologías y subgrafos energéticamente más eficientes. Existen muchas técnicas en el estado del arte que despliegan estás funciones. La figura 3.2 muestra las cuatro principales áreas en las que se basan los algoritmos de conservación de energía con mecanismos de control de topologías en las redes de sensores inalámbricas [99].

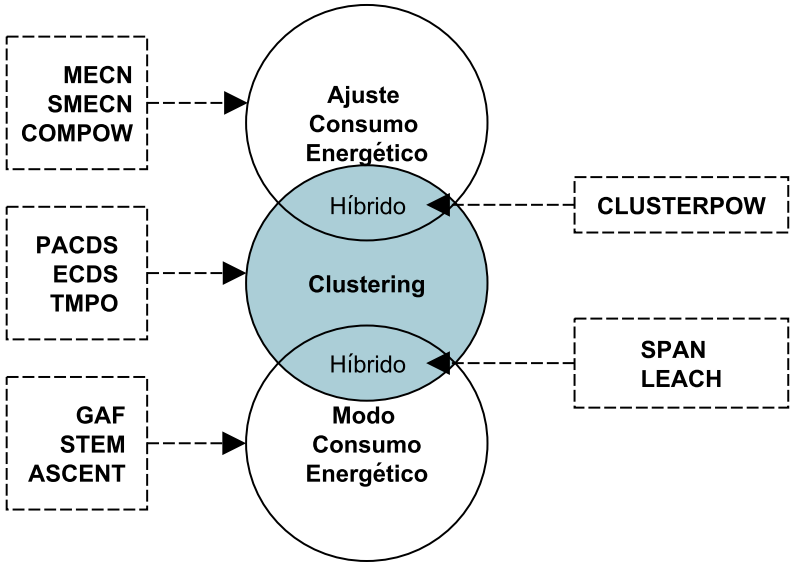


Figura 3.2: Áreas de operación de algoritmos de conservación de energía utilizando TC en WSN.

Las técnicas de ajuste de consumo energético y modo de consumo energético de nodos afectan la disponibilidad de la red ya que limita la operación de los nodos; en cuánto a las técnicas de clúster, la posición entre nodos es sumamente crítica; esto hace que en esquemas de movilidad no rindan muy bien. Las técnicas más robustas para afrontar estos problemas y ser compatible con una inteligencia central (como lo ofrece SDN) son las técnicas híbridas como SPAN.

A continuación exponemos una breve descripción de las técnicas mostradas en la Figura 3.2 :

- **Técnicas de Ajuste de Consumo Energético de Nodos**
  Minimum energy communication network (MECN): Un algoritmo basado en la posición y locación de los nodos, la idea es construir una topología que considere los caminos de menor costo energético para transmitir desde un sensor inalámbrico al nodo gestor.

  Small minimum energy communication network (SMECN): El SMECN es una extensión del algoritmo MECN. Está orientado a construir una red que es más simple, más rápida y más eficiente en el consumo de energía que la generada en MECN. La única diferencia entre SMECN y MECN descansa en el método para determinar los nodos y sus vecinos para el grafo guía.

  COMPOW: La estrategia de conservación de energía en COMPOW consiste en encontrar y utilizar el mínimo nivel común de consumo energético que es suficiente para mantener la conectividad de la red completa.

- **Técnicas de Modo de Consumo Energético de Nodos**
  Geographical adaptive fidelity (GAF): El principio central de GAF es tener un número suficiente de nodos que permanezcan activos para comunicación, y poner los nodos redundantes en modo de dormir sin afectar la conectividad de la red. Para identificar los nodos activos de los nodos redundantes, GAF divide el área de red en pequeñas cuadrículas virtuales.

  Sparse topology and energy management (STEM): El principio de STEM es poner tantos nodos como sea posible en el modo de dormir de manera que el consumo de energía es reducido y el tiempo de vida de la red es extendido.

  Adaptive self-configuring sensor network topologies (ASCENT): Es un algoritmo autoconfigurable que permite a los nodos medir las condiciones de operación locales. En base a estas condiciones, los nodos deciden si ellos necesitan participar en el ruteo o no. Para alcanzar la eficiencia en energía, ASCENT selecciona un subgrupo de nodos para que permanezcan activos para servir como columna vertebral de encaminamiento. Los nodos restantes en la red permanecen pasivos, escuchando a los otros nodos y periódicamente revisando en caso de que ellos necesiten unirse a la columna vertebral de encaminamiento.

- **Técnicas de Cluster de Nodos**

  Power aware connected dominating set (PACDS): Propone un algoritmo simple basado en el concepto de conjunto dominante conectado (CDS) que establece un CDS usando un simple proceso de marca.

  Energy efficient distributed connecting dominating (ECDS): Resuelve algunas limitaciones de energía en las redes inalámbricas de sensores minimizando el tamaño del CDS.

  Topology management by priority ordering (TMPO): Es un algoritmo dinámico que considera movimientos y energía residual cuando se forma la columna vertebral. TMPO introduce los conceptos de *gateway* y *doorway* (los cuáles son adoptados de los métodos de clustering) para conectar los conjuntos dominantes.

- **Técnicas Híbridas**

  SPAN: El algoritmo SPAN [100] usa un híbrido de los modelos de "power mode" y "clustering". Selecciona un subgrupo de nodos para formar la columna vertebral de transmisión usando el modelo de "conjunto dominante conectado" (CDS). Esta columna vertebral de nodos es capaz de enviar paquetes de datos, mantener la conectividad de la red y preservar la capacidad de la red. Basado en decisiones locales, los nodos en SPAN deciden si ellos deberían unirse o salir en la columna vertebral de transmisión.

  CLUSTERPOW: Este algoritmo une el modelo "clustering" con el modelo de "power control" para ganar conectividad de la red, capacidad de la red y eficiencia de energía. El diseño de CLUSTERPOW está motivado por la limitación de COMPOW en el trato con distribuciones de nodos no homogéneas. La elección de utilizar el nivel común mínimo de energía en COMPOW no es apropiado para redes no homogéneas porque el nivel común mínimo de energía es determinado por el nodo más lejano. Como una solución, CLUSTERPOW une el control de topología con el encaminamiento y selecciona un nivel mínimo óptimo de poder para cada cluster.

3.1.1.7 **Conclusiones**

El despligue de WANETs autoorganizadas y a gran escala esta siendo impulsado por los desarrollos tecnológicos recientes tales como IoT, entornos inteligentes, y aplicaciones para ambientes inteligentes. El uso eficiente de los recursos de energía de los nodos de WANETs es clave para soportar estos avances; así, la aplicación de métodos de control de topologías tendrán un profundo impacto en la eficiencia de energía y por lo tanto, en el tiempo de vida de las baterías de los nodos.

Una técnica eficiente que es posible desplegar en un entorno donde el enfoque SDN esté integrado con la administración de grafos de redes es el TC. El TC es una técnica usada para conservar la energía y extender el tiempo de vida de la red sin afectar el rendimiento en términos de conectividad y capacidad de comunicación. La idea de TC es conceder a los nodos un sentido de control sobre ciertos parámetros de tal forma que puedan ser manipulados para que la red se vea beneficiada. Específicamente, los nodos tienen la capacidad de ajustar el rango de transmisión de su interface de radio, cambiando entre varios modos de operación o incluso decidiendo sobre la elegibilidad de nodos que se unen a la columna vertebral de comunicación de una red. Este trabajo propone utilizar esta técnica para decidir sobre la elegibilidad de nodos a una columna vertebral de la red, desde una perspectiva que considere el consumo de energía.

Span es un algoritmo de TC distribuido y aleatorio, donde los nodos toman decisiones locales entre salir o unirse a una columna vertebral de reenvíos como un coordinador. Cada nodo basa sus decisiones en una estimación de cuántos de sus vecinos se beneficiarían de su coordinación, y el monto de energía disponible en él. Span elige adaptativamente *coordinadores* entre todos los nodos en la red. Cada nodo emite periódicamente mensajes que contienen información del estado del nodo, sus coordinadores actuales y sus vecinos actuales. También, periódicamente, un nodo *no-coordinador* determina si debería convertirse en *coordinador* o no. La siguiente regla de elegibilidad de coordinación en Span asegura que la red entera este cubierta con coordinadores suficientes: Un nodo *no-coordinador* debería convertirse a *coordinador*, si descubre usando solamente información contenida en los mensajes emitidos localmente, que dos de sus vecinos no pueden alcanzarse uno al otro directamente o vía uno o dos coordinadores. Es importante considerar

qué colisiones de mensajes se producen cuando múltiples nodos descubren la falta de un *coordinador* al mismo tiempo, y todos deciden convertirse a *coordinador*. Span resuelve la contención retrasando los anuncios de *coordinador* con un cálculo aleatorio del tiempo de retraso.

No obstante, Span no está habilitado para desplegarse fuera de un entorno de redes de sensores inalámbricas de tecnologías homogéneas. También, Span no es capaz de ejecutarse en entornos que no soporten el control de topologías. Además, todos los estados de la red se pierden, ya que no se están registrando en ningún ente principal que este fuera del comportamiento del algoritmo. Dichos estados de la red podrían ser un conocimiento útil para la toma de decisiones más eficientes dentro de los procesos de los servicios de red, generar historiales de estados o incluso volver a un estado específico. Otro motivo por el que se sugiere extender las capacidadesde SPAN es que en el estado actual las reglas del algoritmo central no se puede cambiar, tampoco es posible combinar en tiempo de ejecución reglas de otros algoritmos.

En los apartados anteriores se han descrito las maneras actuales de abordar la consciencia energética con el objetivo de ahorrar energía. Sin embargo, dichos enfoques limitan las posibilidades de administrar redes con tecnologías homogéneas y heterogéneas de forma conjunta, ya que ninguno de los alcances actuales maneja la semántica del control y el orden de la red de forma separada. Así, la siguiente evolución en los ambientes de red es que las redes se vuelvan concientes del conocimiento de los patrones que siguen los diferentes estados de red en el tiempo. Como resultado, los despliegues van agregando grados de abstracción a las capas de red, de los cuáles se destaca el concepto de orden por ser donde se concentra el control y la influencia de los comportamientos de los tipos de nodos. A partir de este razonamiento es que la concepción de las redes separa la topología (grafos), el plano de control y el plano de datos.

La posibilidad de utilizar SDN como base para una solución que use grafos como el plano de control de una red se muestra por ejemplo en [101]. Los grafos son una representación fiable de una red real y su administración puede ejecutarse desde el controlador central. Así, tenemos un marco de ejecución de bajo coste y con el dinamismo que requieren las aplicaciones actuales. La especialidad de SDN es alcanzar una visión global de la red, lo que al unirse con la administración

de grafos de topologías de red simplifican significativamente la administración del entorno de red.

Así, esta propuesta propone desarrollar una WANET definida por software para optimizar el tiempo de vida de la red en términos de consumo energético. Al mismo tiempo, la propuesta busca ser capaz de extender su operación de forma eficiente en ambientes estáticos y móviles de redes heterogéneas. La más importante innovación que hace diferente esta propuesta es su habilidad de abstraerse hacia un control de red centralizado, un control de red distribuido o un control de red híbrido (un punto intermedio entre un control de red central y distribuido).

3.1.2 Eficiencia energética por SDN

Actualmente existen propuestas de aplicación de SDN para la consciencia energética, la mayoría de ellas en redes de infraestructura; ya que, esta tecnología se inició en estos entornos. Luego, la tecnología SDN ha ido abarcando todos los tipos diversos de redes. Nuestra investigación se enfoca en redes WANETs, por lo que se analiza su aplicación a dicho dominio desde una perspectiva energética.

3.1.2.1 Enfoques SDN para la Consciencia Energética en Redes Inalámbricas

Como mencionamos anteriormente, las tendencias SDN que se aplican a entornos de infraestructura poco a poco también evolucionan hacia los entornos de redes inalámbrica.

Enfoques como [102] se centran en distribuir la carga de tráfico entre las diferentes estaciones base de una red inalámbrica. Como tenemos una visión completa y centralizada de la red es fácil detectar los momentos de bajo tráfico y distribuir las comunicaciones en pocas estaciones base. Las estaciones base que no se usen pueden configurarse en modo “reposo” para ahorrar energía.

También en [102] se propone un algoritmo para encontrar una configuración de ahorro entre el consumo completo de energía y la calidad de los servicios de la red inalámbrica. La estrategia plantea una arquitectura de 3 planos separados e independientes. La separación de planos es la siguiente: el plano de aplicación, el plano de control y el plano de datos. Esta solución prueba que es posible minimizar el impacto energético durante cargas de tráfico bajas mediante un algoritmo en

el plano de control que manipule los estados de las estaciones base de una red inalámbrica.

Por otro lado, autores en [78] han utilizado un encaminamiento híbrido que despliega diferentes algoritmos de encaminamiento en una misma red de sensores inalámbricas demostrando la flexibilidad de la tecnología SDN para la resolución de problemas y aprovisionamiento de información de la red. Sin embargo, no brinda detalles de como aplicar técnicas de encaminamiento consciente de energía al alcance híbrido propuesto.

3.1.2.2 **Virtualización SDN en Redes Inalámbricas**

En el trabajo de investigación [103] se establecen conceptos fundamentales para alcanzar una virtualización de la infraestructura que soporta aplicaciones IoT, a través de SDN. Este enfoque virtualizado es aplicable a un escenario de topología aleatoria. Además, la virtualización IoT mediante SDN busca lograr los siguientes objetivos: compartir los recursos de los sensores y nodos, establecer redes de sensores multi-operacionales y extender el alcance del areá de trabajo sin establecer ninguna red física adicional. Está visión también es extensible a soluciones relacionadas con la conciencia del contexto y computación ubicua.

En investigaciones como [104] se integran los marcos de trabajo de SDN, NFV y la administración de inteligencia de la red con el objetivo de optimizar el streaming de video desde un punto de vista de conciencia energética. La arquitectura general de este marco de trabajo incluye componentes que forman las capas de: infraestructura, red virtual, control, autonómica e interface. De esta forma se crean unas condiciones óptimas de operación en forma innovadora que se centra en el estado de la red, la calidad de la experiencia del video y el consumo de energía.

3.1.2.3 **Técnicas de Control de Topologías de Redes**

SDN, potencia la definición y cambio de topologías de red, y este hecho facilita que este enfoque pueda considerar una o varias técnicas de control de topologías de red para alcanzar objetivos de ahorro energético. Actualmente, las técnicas de control de topologías son fijas al tipo de red donde operan; sin embargo, dentro de SDN, al permitir abstraer el plano de control para que sea administrado con lógica

de programación se vuelve posible utilizar una técnica de control de topología, indistintamente al tipo de red que pertenezca.

Los principales objetivos de TC son dos. El primer objetivo es prolongar el tiempo de vida de un nodo y la red, y el segundo es disminuir las colisiones de mensajes. La principal idea es descartar los enlaces ineficientes para producir una reducción en la retransmisión de paquetes e interferencia y una mejora en la capacidad de la red.

El modo más común de utilizar el control de topologías para lograr ahorros de energía lo vemos en [105]. Por lo tanto, es posible concebir la prolongación del tiempo de vida de la red mediante un control de topologías basado en la puesta a punto de la energía de transmisión de los nodos para controlar la red.

Adicionalmente, en [106] los autores estudian una taxonomía de los esquemas de conservación de energía más significativos en redes de sensores inalámbricas. El control de topologías se define dentro de la categoría de tareas cíclicas. Así mismo, dentro del control de topologías podemos encontrar técnicas orientadas a la localización de los nodos y técnicas orientadas a la conexión de nodos. Pensamos que desde una perspectiva de administración de planos de red separados mediante SDN, donde el plano de control es claramente una inteligencia central administrable, los mecanismos de tareas cíclicas para la conservación de energía son compatibles para lograr ventajas sobresalientes.

3.1.2.4 **Manejo del Espectro Electromagnético con SDN**

Una de las aplicaciones prometedoras para SDN es su adaptación dinámica en el manejo del espectro electromagnético en redes de acceso por radiofrecuencia. Como analizan los autores en [107], SDN proporciona ventajas para adaptar las fluctuaciones del espectro de acuerdo a las demandas por usuario. Dichas adaptaciones son realizadas en ejecución a través del abastecimiento consciente de demanda y dinámico de máquinas virtuales y asignación de recursos. Por consiguiente, el espectro se utiliza con una reducción en la tasa de datos con el objetivo de ofrecer una mayor eficiencia energética.

También, podemos consultar en la literatura que el manejo del espectro junto con SDN ha sido utilizado para crear redes auotorganizadas. Como se muestra

en [108], SDN es la base para automatizar la administración de mecanismos relacionados a la planificación de la red, configuración y optimización que requieren programabilidad de red en el plano de control y el plano de red. Las capas funcionales que son creadas con esta programabilidad son: capa de auto-configuración, capa de auto-saneamiento y capa de auto-optmización.

3.1.2.5 **Desacople de la administración de los grafos de redes inalámbricas**

Mucha de la inteligencia de una red subyace en las abtracciones de su forma i.e. las construcciones de grafos que conforman su topología. Diversos estudios sugieren aislar está inteligencia para obtener el control de la "consciencia" de una red inalámbrica.

La investigación [109] nos muestra que el control de topología es útil para lidiar con ambientes heterogéneos. El trabajo de investigación muestra que algoritmos como grafo de vecindad relativa dirigido (DRNG) o árbol de expansión mínimo local dirigido (DLMST) pueden ser ajustados para ser desplegados en redes con rangos de transmisión no uniformes. El enfoque del estudio es construir topologías sobre un entorno distribuido donde cada nodo construye su grupo de vecinos y ajusta su energía de transmisión basado en la información recolectada localmente.

También, diferentes algoritmos de control de topologías para WANETs son analizados en [110]. En este trabajo los autores sugieren un control de topología distribuido con fases de corrección y análisis competitivo entre nodos. Además, los nodos son capaces de una parametrización que se rige por variables críticas tales como: energía remanente, potencia de transmisión, errores en paquetes. Dichas variables críticas establecen umbrales de consumo de poder de la red; por lo que, la red es susceptible a configuraciones de acuerdo a los requerimientos de sus servicios.

En [111] es posible analizar como el control de topologías basado en algoritmos que calculan el camino más corto entre nodos se aplica a las redes inalámbricas de malla. Las etapas sugeridas para la creación de topologías son las siguientes: construcción del árbol de caminos más cortos, recolección de información e intercambio, construcción de una topología de vecindad lógica y visible, cálculo de energías de transmisión y remoción de enlaces unidireccionales.

Algunos autores abordan en [112] una inspección de los impactos del manejo de grafos y subgrafos de red en las capas de aplicación o servicios. Los autores proponen un marco de ejecución general para el control de topologías desde una perspectiva orientada a los servicios en redes inalámbricas. Los principales objetivos de este enfoque son: maximizar la capacidad total de manejo de paquetes de la red, proveer retardos extremo a extremo satisfactorios y mejorar la seguridad y fiabilidad de las comunicaciones.

Debemos tener en cuenta que el control de subgrafos y grafos puede concebirse desde diversas visiones. Para [113], el control de grafo y subgrafo de la red puede gestionarse sin disponer de la información de la posición de los nodos. En vez de eso, este enfoque opera con una noción general de orden sobre la calidad de los enlaces entre vecinos. El enfoque se ejecuta mediante tres etapas principales: ordenamiento de los vecinos, cambios en el ordenamiento de vecinos y selección del enlace.

El trabajo [114] aborda diversos problemas relacionados con el control de grafos en WANETs. Explora enfoques de como sobrepasar estos problemas y establece importantes líneas de futura investigación en este tema. Con el control de grafos se abordan aspectos como: el rango crítico de transmisión, densidad de las redes, dispersión de las redes, el problema de asignación de rangos, subgrafos simétricos, comunicaciones broadcast, aspectos de movilidad, sobrecarga de mensajes e interferencias.

También, como podemos consultar en [115], la gestión de topologías y grafos puede equipar a los nodos de una red inalámbrica con la capacidad de administrar múltiples interfaces mediante la asignación múltiple de canales en el espectro de radio. La principal idea es separar la asignación de canales de las funciones de control de topologías, pero con la consideración que la asignación de canales se basará en expansiones del grafo de red. Además, estas capacidades hacen que los grafos de red principales y expandidos soporten comunicaciones de tipo difusión ancha.

La versatilidad del control de topologías y grafos se aplica a la red troncal de las redes inalámbricas de malla en [116]. El enfoque propone superar la naturaleza transitoria de enlaces inalámbricos en los cambios de topología de este tipo de redes. Adicionalmente, otro objetivo del enfoque es utilizar esquemas de control

de grafos y subgrafo ligeros para la viabilidad del control de energía. Algunas de las propiedades del diseño de esta propuesta son: mantenimiento de la conectividad de red, enfoque totalmente distribuido, información de localización de nodos, información de vecindarios y pequeño grado de nodos en vecindarios.

El enfoque [117] propone el uso de topologías, grafos y subgrafos para optimizar la máxima energía utilizada en las redes WANETs estáticas y móviles. Los autores trabajan con los conceptos de conectividad, dirección de antena y biconectividad de los nodos en respuesta a los cambios topológicos.

A su vez, la literatura expone en [118] el control de topologías para el uso eficiente de energía. Para reducir el consumo energético, los autores proponen la construcción de grupos dominantes conectados (CDS). Además, el alcance de la propuesta considera el grado de efectividad de los nodos dentro del grafo de red.

Complementariamente, en [119] se estudian diversos enfoques para abordar la eficiencia energética de redes WANETs desde el control de topologías. Los objetivos del enfoque son: alcanzar en todo momento conectividad y eficiencia energética, alto rendimiento de la red, robustez a la movilidad, soporte a algoritmos de encaminamiento plano, soporte a algoritmos de encaminamiento jerárquicos, soporte de protocolos de encaminamiento jerárquicos y despliegue de modelos de nodos adversarios.

3.1.2.6 **Discusión**

Hemos analizado diversas estrategias y visiones de la literatura que se están utilizando actualmente para obtener conciencia energética en redes inalámbricas por medio del despliegue de arquitecturas basadas en SDN. De todas estas estrategias, la que presenta la mayor robustez en relación con nuestros objetivos energéticos es la gestión de topologías, grafos y subgrafos; ya que, alcanza ahorros energéticos significativos sin comprometer la disponibilidad de los servicios específicos de la red. Además, la gestión dinámica de grafos y subgrafos de red puede ser complementada con tecnologías como programación *sobre-el-aire* (OTAP) y hardware de lógica reconfigurable (FPGA) para crear sistemas cuyo comportamiento puede ser redefinido por demanda.

Los enfoques aislados por capas de red no cuentan con las capacidades de adaptación en tiempo de ejecución que requieren los contextos de WANETs autogestionables. Además, las mejores prestaciones de un enfoque aislado no pueden extenderse a diferentes tecnologías y servicios de red. Por otro lado, una propuesta SDN única y sola no cuenta con las representaciones de conocimiento necesarias para entender variables de su entorno y comportarse eficientemente de acuerdo a ellas. La virtualización SDN es una combinación de tecnologías que brinda capacidades de incorporar capas de conocimiento en la red, sin embargo, la conciencia del contexto debe construirse y recae en otras entidades por ejemplo algoritmos de control de patrones de red.

Al estudiar las soluciones propuestas es evidente que los patrones de construcción de los grafos de una red son un conocimiento clave para dotar a la red de cierta inteligencia de su contexto. Por lo tanto, la gestión de grafos y subgrafos de red en línea con la integración con SDN (control desacoplado de los datos de la red) se plantea como la solución más eficaz para alcanzar nuestros objetivos de ahorro energético.

Como analizamos en los apartados anteriores, con SDN es posible combinar visiones aisladas con el desacople del conocimiento del control de una red para crear un nuevo grado de abstracción; no obstante, no existe una integración entre los diferentes marcos de trabajo. Como resultado, dichas visiones aisladas no están diseñadas para las distintas formas y capacidades ubicuas de las entidades virtuales(construcciones de código) de las WANETs del futuro. Esta propuesta cubre esa brecha integrando el conocimiento en una entidad que incluya toda la "inteligencia de red", pero que luego cree y genere el conocimiento específico que un componente necesite en determinado tiempo.

3.1.3 Eficiencia energética en redes homogéneas y heterogéneas

Las WANETs pueden dividirse, de una forma general, en redes homogéneas y redes heterogéneas. Ambos tipos de redes se encuentran en constante demanda de crecimiento. Es importante analizar el estado actual de los acercamientos para buscar la eficiencia energética dentro de esta división porque las entidades virtuales de las

futuras WANETs se rigen por conceptos del control sobre ambientes homogéneos, heterogéneos o ambos.

Esta propuesta se centra en redes inalámbricas heterogéneas, sin embargo las capacidades que se agregan habilitan a la red para superponer la heterogeneidad y la homogeneidad de acuerdo a las demandas. Por tal motivo, se analizan ambas categorías de redes.

Así, para hacer frente a la demanda de crecimiento de las redes móviles, en el futuro, estas redes deberán integrar sus tecnologías heterogéneas. SDN habilita a la red la capacidad de dividirse en una capa que controla la *tecnología específica* y una capa que es agnóstica al tipo de tecnología. Por ejemplo, [120] sugiere colocar un módulo llamado *transportador de tecnología*, el cuál consolida las tecnologías abstrayendo: nodos, enlaces disponibles y enlaces utilizados; luego, gestiona el tráfico y lo traduce a una plataforma común para el controlador principal de la red.

La literatura examina en [121] los escenarios de redes heterogéneas donde es factible una aplicación del enfoque SDN. El argumento es que en el futuro contaremos con un mundo totalmente conectado de redes heterogéneas, por lo tanto, explorar soluciones eficientes para despligues en estos escenarios se vuelve una prioridad de la investigación. Así, la formulación de soluciones heterogéneas basadas en SDN podrían soportar la evolución de ambientes heterogéneos incluyendo despliegues sobre los dispositivos finales, administración de múltiples dominios de control, soportar un grupo flexible de reglas y acciones, reconocer diversas capacidades de los dipositivos de red, tolerancia a retrasos y rupturas de la comunicación, y expandir e integrar la red con otros planos de control.

Actualmente, la redes heterógeneas y homogéneas atacan los problemas de consumo de energía desde una visión parcial tanto en nivel de capas de un modelo de red como de la tecnología de comunicación que se utiliza en cada tipo de red.

Además, las nuevas visiones para alcanzar conciencia energética en redes heterogéneas deben lidiar con entornos mixtos que combinan redes móviles y redes estáticas. Los esfuerzos recientes de volver la red programable e independiente de la tecnología subyacente han creado algunas soluciones que hacen frente a la heterogeneidad de las nuevas redes y al mismo tiempo alcanzar ahorros energéticos en la operación; pero, dichas soluciones se encuentran en pleno desarrollo e investigación y aún no están sólidas en sus despliegues.

Similarmente a la tendencia en redes homogéneas, dichos esfuerzos de separación de planos de red desde una perspectiva de ahorro energético han iniciado en redes de infraestructura y poco a poco van incursionando en ambientes inalámbricos como las WANETs.

3.1.3.1 Administración Separada del Plano de Control y Plano de Datos

Gestionar planos separados de control y planos de datos en la redes se perfila como una opción robusta para superar las limitaciones de los enfoques actuales ante el crecimiento desbordado de aplicaciones IoT. La literatura expone en [122] como está visión hace posible la programación de la red y abre la posibilidad de crear nuevos servicios y aplicaciones más eficientes que cubran estos nuevos requerimientos. En síntesis, este enfoque supera la ineficacia de las rígidas arquitecturas de red tradicionales y proyecta las nuevas redes a escenarios con amplios alcances en comunicación, modelos de negocios y aplicaciones.

También, este modelo de administración permite subir el grado de abstracción de conocimiento de la red para desplegar todas las capacidades de separación de preocupaciones relacionadas con la gestión de los estados de red. Luego, es posible combinar, de acuerdo a requerimientos, las visiones y tecnologías fijas y aisladas de red con las que se cuenta actualmente.

En [123] es posible examinar la eficacia del manejo separado de planos en la red para despliegues en arquitecturas de nube. Es posible atacar más eficientemente los problemas de movilidad y las condiciones inseguras de enlaces inalámbricos. Otras prestaciones de este enfoque son: selección de rutas basadas en un mapeo global, transmisión multiruta, retroalimentación personalizada de preferencias de usuario, múltiples interfaces inalámbricas para nodos inalámbricos, interface inalámbrica configurable, reserva de tráfico privilegiado, frecuencias de saltos configurable.

También, [124] desarrolla la idea de abordar el desafío técnico de acoplar la coexistencia de ambientes dinámicos de subredes en los despliegues, cada vez mayores, de aplicaciones IoT. El enfoque toma ventaja de la administración separada de planos para alcanzar diferentes niveles de servicio de acuerdo a las tareas IoT en los diferentes escenarios de red.

Concebir la red con un plano de control independiente en una red simplifica la implementación de tecnologías que crean un hardware programable. En [125] los

autores introducen una implementación de la tecnología SDN en las redes ópticas móviles (un tipo de red WANET), con el objetivo de simplificar la asignación y simplificación de recursos en la red. Así, los autores estudian como el plano de control es crítico para la aplicación de diversas arquitecturas de red; por ejemplo, las arquitecturas multi-capas para nodos que son capaces de mezclar el tráfico de tipo paquetes y tráfico tipo circuitos sobre la misma longitud de onda.

Las aplicaciones de la gestión de planos separados de red se extienden a las redes de hogar. Como estudia [126], la gestión separada de planos de red habilita una auto-personalización automática de los servicios de dispositivos y aplicaciones en los hogares. Además, este tipo de soluciones facilita la fusión de funcionalidades con las tecnologías de nube permitiendo escalar a una nueva dimensión de adaptación de control de usuario, discriminación de la calidad y oportunidades de modelos de negocio.

Algunos autores comprueban en [127] que la gestión por planos de red es efectiva para crear una plataforma consciente del tráfico en la siguiente generación de redes. Los autores combinan el funcionamiento centralizado de los planos de red, así como el funcionamiento distribuido de los mismos, de acuerdo a parámetros críticos como la tasa de envío, sobrecarga de encaminamiento, ruido y retrasos. Además, se vuelve más eficiente el manejo de tráfico homogéneo y heterogéneo.

En redes de sensores inalámbricos, autores como [128] describen una solución que tiene el objetivo de hacer los nodos programables como una máquina de estados finitos; entonces, se habilita en ellos la capacidad de ejecutar operaciones que no son soportadas por soluciones sin estado. Este enfoque permite a los programadores incrementar la flexibilidad y simplicidad de la red utilizando el lenguaje de progrmación de su preferencia.

Otro caso de uso de la versatilidad de administrar los planos de red mediante SDN se muestra en [129]; donde, se da una perspectiva de como utilizar los ambientes de red como servicio (NaaS) desplegados en la nube considerando librerías compartidas de grafos, que manejan las funcionalidades de administración de la red que dependen de el grupo de primitivas de grafos subyacente. Esta solución es una arquitectura extensible para mecanismos dinámicos de consulta de grafos que pueden ser implementadas con tiempos de cómputo prácticos, en presencia del dinamismo de una red.

También, la literatura estudia en [130], cómo la futura infraestructura de las nuevas redes puede ser soportada por el enfoque SDN. Además, establece las pautas de cómo SDN extiende la gama de características de las comunicaciones inalámbricas y móviles. Así mismo, en la referencia se analizan las potenciales aplicaciones de la gestión de planos de red en: redes inalámbricas de infraestructura pesada, redes celulares, redes inalámbricas de malla, redes inalámbricas de hogares y operadores de red inalámbricos rurales.

En el mismo sentido, acorde a [131], la propuesta de planos de red controlados mediante SDN apalancará las tecnologías de redes 5G. Así, unificar planos de control homogéneos y heterogéneos cumplirá los nuevos requerimientos de escalabilidad, latencia, armonización de pilas de protocolos planos de datos fijos y móviles, movilidad distribuida, eficiencia energética y acceso unificado a las redes.

Por lo tanto, cuando contamos con planos de red separados e independientes estamos logrando un grado de abstracción eficiente para el soporte de las futuras tecnologías de redes. Este grado eficiente de abstracción se complementa plenamente con el entorno SDN al flexibilizar la inteligencia de la red. Así, algoritmos de conciencia energética que aprovechen las ventajas de una inteligencia flexible de red pueden expandir sus capacidades y mejorar los ahorros energéticos dentro de una red inalámbrica.

3.1.3.2 **Redes Autogestionables**

En [132], es posible analizar como SDN se gestiona para volver a la red más cognitiva con respecto a su rendimiento. Cuando se logra que la red tenga una *cierta conciencia* de su rendimiento se minimizan las pérdidas o retrasos de paquetes, se priorizan los objetivos del QoS, se compensan componentes que fallan, se adapta el descubrimiento de servicios y se puede reaccionar ante intentos de intrusión en la red. Todo esto se traduce en ahorros energéticos.

La redes del futuro tienden a ser definidas por software para adaptar los cambios en el flujo de trabajo, el software que usan, ofrecer portabilidad de aplicación a través de diferentes proveedores de hardware y habilitar la capacidad de tener cierto nivel de auto-consciencia de sus procesos.

3.1.3.3 Mecanismos por Demanda

Un prototipo basado en dispositivos de plataforma abierta que demuestra la eficacia del aprovisionamiento por demanda de red en un plano de control centralizado se expone en [120]. La arquitectura habilita la administración de redes móviles heterogéneas mediante el uso de primitivas centrales. Además, estas primitivas son mapeadas progresivamente dentro de una funcionalidad específica de tecnología gracias a un despachador de tecnología por demanda.

Las arquitecturas con una visión del plano de control separado y con funciones por demanda logran un equilibrio coherente entre ahorro de energía y procesamiento; no obstante, la disponibilidad de la red puede verse penalizada para ciertos servicios que requieren las funcionalidades por demanda de forma constante;. También, la mayoría de este tipo de arquitecturas son diseñadas para adaptarse a las aplicaciones finales; sin embargo, en los futuros entornos de redes heterogéneas se requerirá la capacidad de mezclar arquitecturas padaptables y arquitecturas rígidas de acuerdo a los requerimientos del entorno; por lo que, nuevas extensiones en la programación de comportamientos son requeridas.

3.1.3.4 Enfoque SDN para la Consciencia Energética en Redes Heterogéneas WANETs

En el caso de las redes heterogéneas WANET, para lograr una conciencia energética basada en SDN solo existe una propuesta enfocada a reducir el consumo de los nodos, y que se basa en mecanismos de *sleep scheduling* para WSNs.

En esta propuesta [133] los autores establecen que cada cómputo de los mecanismos *sleep scheduling* puede ser completada en un controlador central en vez de en cada nodo y así eliminar el broadcasting entre dos nodos. La solución propuesta considera el conocido algoritmo ECCKN como su algoritmo fundamental para realizar las tareas de *sleep scheduling* y distribuir el consumo de energía en la red completa. El algoritmo ECCKN tiene como finalidad establecer vecindarios donde cada nodo posea K número de vecinos despiertos de manera que la red completa este conectada y consuma energía de forma uniforme. Luego, el enfoque adopta una base de operación donde la inteligencia es centralizada (SDN) para ejecutar dichos

algoritmos que controlan cuáles nodos están dormidos o despiertos a determinado tiempo.

No obstante el problema de esta opción es que si bien el consumo de los nodos se ve reducido, no garantiza la disponibilidad del conjunto de la red, ya que obliga a desactivar sus nodos con un criterio específico. Los nodos conocen su rango de energía restante; Luego, se actualiza con el rango de energía restante de sus vecinos despiertos y transmite el suyo al vecindario; Entonces, se verifica que se cumpla con el umbral de *k* vecinos establecidos y se realiza la comparativa de rangos de energía entre los nodos del vencindario; así, el nodo actual se pone a dormir si se cumplen estas dos condiciones a la vez:

- Cada par de nodos vecinos está conectado ya sea directamente o a través de nodos con un alcance de dos saltos dentro del vecindario y que tengan un rango de energía mayor que el del nodo.
- Cada nodo en el vecindario tiene al menos k vecinos dentro de los disponibles desde la comparativa de rangos de energía.

Con este enfoque, la orquestación de múltiples tecnologías y eficiencia energética está controlada; no obstante, la fragmentación de la red es alta debido a la interrupciones de disponibilidad de servicios. Este problema puede ser abordado utilizando el nuevo conocimiento obtenido en el plano de control, ya que esto permite identificar propiedades y patrones de comportamiento de las entidades de red que pueden gestionarse desde un punto de vista de conciencia energética sin necesidad de interrumpir la disponibilidad de la red.

3.2 Resumen, Discusión y Conclusiones

En este capítulo hemos realizado una revisión de la literatura de las propuestas actuales para lograr conciencia energética en redes homogéneas y heterogéneas. Primeramente, la sección explora la conciencia energética en las redes inalámbricas junto con sus implicaciones en la disponibilidad de los servicios de red, ya que la eficiencia energética debe impactar lo mínimo en los servicios que ofrece y mantener operativa la red. Esta parte también introduce la visión de una administración separada de los planos de control y de datos desde el punto de vista del gasto energético (conciencia energética a través de SDN). Además, hemos abordado la gestión de topologías de red mediante la noción de grafos y subgrafos. Este conocimiento ha sido relacionado con las novedosas extensiones de inteligencia que se logran en la red a través de la separación del control. Finalmente, el capítulo expone las implicaciones de la disponibilidad de servicios, de los enfoques actuales, cuando se busca la eficiencia energética en redes heterogéneas desde una perspectiva SDN.

Es evidente que los enfoques concebidos no cuentan con una visión modular de los componentes de la red (algoritmos de encaminamiento, detección de errores, comunicación entre capas de red, interfaces entre protocolos de distintas tecnologías físicas, etc), ni que dichos componentes estén habilitados para entenderse o compartir información entre si. Además, está claro que los componentes de red no se diseñaron para tener la capacidad de separse o construirse en tiempo de ejecución de los servicios de red. De la misma manera, el control sobre la topología no ha estado separado de las demás entidades que conforman la red. Como muestra la literatura, actualmente ya es posible agregar está separación del control por lo que se convierte en conocimiento clave para percibir el contexto de la red y alcanzar formas novedosas de eficiencia energética.

Los puntos más penalizados en las soluciones actuales son la disponibilidad de red, la rigidez de las configuraciones en relación al estado de su contexto y la imposibilidad de compartir métodos y procedimientos entre entidades heterogéneas. Por consiguiente, las nuevas visiones propuestas deben sobrepasar estas limitaciones, y esto se logra integrando nuevas abstracciones de inteligencia multicapa dentro de la red.

3.2.1 Discusión

Siguiendo la misma aproximación que en las redes homogéneas, si queremos lograr comportamientos conscientes del gasto energético en WANETs heterogéneas sobre la capa de red, es preciso administrar varios tipos de mecanismos de control de red, por lo que se opta por SDN como modelo para gestionar de forma centralizada el plano de control de todas esas redes.

Se ha razonado que la separación eficiente del plano de control de red habilita posibilidades que equilibran el ahorro energético, la independencia entre tecnologías y la flexibilidad de aplicación de algoritmos con la disponibilidad de servicios de estas nuevas redes. Así, en este trabajo proponemos un enfoque que englobe la heterogeneidad, la movilidad de los nodos, redes estáticas y la diversidad de tecnología hardware que se presentan en las nuevas redes para aplicaciones IoT.

Analizando lo descrito en la sección 3.1.3.4, los esfuezos actuales para obtener una red WANET consciente del gasto energético basado en SDN muestran las siguientes ventajas y desventajas.

Ventajas

- La abstracciones de control y de manejo de datos se vuelven agnósticas a los modelos subyacentes. Por lo tanto, se abre una gama de posibilidades para que combinaciones de tecnologías completamente diferentes puedan coexistir con las mismas directrices de inteligencia.

- Dinamismo entre capas del modelo de red utilizado o la combinación de modelos adoptado. Esto vuelve la inteligencia de las redes capaz de ejecutar algoritmos y mecanismos a cualquier nivel del modelo de red, así como traducir procesos e información entre modelos de red incompatibles entre si.

- Capacidad de orquestar redes inalámbricas heterogéneas estáticas o móviles. Así, es posible afrontar las especificidades de la movilidad y la no movilidad de forma separada e inteligente dentro del mismo esquema de red.

Desventajas

- La normalización de soluciones de conciencia energética basadas en SDN para WANETs aún se encuentra en sus inicios. Por lo tanto, las diferentes

propuestas de solución aún tienen muchos retos técnicos y físicos por sobrepasar. También, las investigaciones aún deben avanzar en las nuevas posibilidades abiertas con las abstracciones centralizadas progamables; por ejemplo, muchos algoritmos y mecanismos antes aislados en un tipo de tecnología, ahora son aplicables de forma eficiente en entornos mixtos WANETs.

- El problema de disponibilidad de servicios de red sigue siendo un punto con mucho margen de mejora en las soluciones actuales propuestas. La inteligencia administrable y global debe enfocarse en lograr los objetivos estipulados sin perder la disponibilidad de los nodos de la red.

- La mayoría de propuestas y trabajos de investigación son para redes con protocolos de infraestructura. Similarmente a lo ocurrido en redes homogéneas, SDN se fortalece primero en redes de infraestructura para luego evolucionar a redes inalámbricas; Así, existen pocas propuestas que experimenten con las posibilidades de un entorno SDN compatible con WANETs heterogéneas.

- Poca explotación de la visión basada en grafos y subgrafos, ya que estos mecanismos generalmente han sido más aplicables a las WSN, sin la posibilidad de extenderlos a otros tipos de redes por su especificidad a las capas del modelo de red WSN. Esto ha limitado las propuestas para obtener conciencia energética utilizando estos mecanismos. No obstante, con los nuevos enfoques SDN se eliminan estás barreras y los mecanismos de grafos y subgrafos se pueden aplicar independientemente de la red subyacente.

Por lo tanto, las desventajas muestran que las características de las propuestas existentes no se acomodan a la visión de sobrepasar las limitaciones del aislamiento y la separación de preocupaciones no relacionada entre entidades de red.

La tabla 3.1 presenta un resumen de los principales conflictos de la conciencia energética en redes homogéneas y heterogéneas.

Es evidente la necesidad de una propuesta que considere desde su núcleo la eficiencia en uso de energía para WANETs ubicuas heterogéneas. Además, la complejidad de las tecnologías heterogéneas debe ser absorbida por el control global

Despliegue Predominante	**Aplicación**	Disponibilidad de servicios	Compatibilidad diferentes modelos	Orquestamiento de múltiples tecnologías	Extensión de diferentes capas del modelo	Integración de infraestructura y WANETs	Gestión de topologías
Homogéneas	Mecanismos de encaminamiento		✓	✓	✓	✓	
Homogéneas	Algoritmos Unicast		✓	✓	✓	✓	✓
Homogéneas	Algoritmos Multicast		✓	✓	✓	✓	
Homogéneas	Capa MAC		✓	✓	✓	✓	✓
Homogéneas	Capa de aplicación		✓	✓	✓	✓	✓
Homogéneas	Encaminamiento SDN	✓			✓		✓
Homogéneas	Virtualización SDN	✓					✓
Homogéneas	Manejo del espectro		✓	✓	✓	✓	✓
Homogéneas	Control de topologías		✓	✓	✓	✓	
Heterogéneas	Autogestionables	✓	✓	✓	✓		
Heterogéneas	Mecanismos por demanda	✓					✓
Heterogéneas	Enfoque SDN				✓		✓

Tabla 3.1: Principales conflictos de la conciencia energética en redes inalámbricas

de la red de una forma factible. Finalmente, la nueva propuesta debe ofrecer interfaces multicapa entre las entidades físicas, virtuales y abstractas que conforman las WANETs.

Así, esta investigación aborda las brechas mencionadas para construir un despliegue que sea capaz de:

- Extender su conocimiento de capas en los monitoreos del ente controlador.
- Combinar funciones de ahorro energético en diferentes niveles de las capas de red. Por ejemplo, agregar capacidades energéticas al controlador por medio de enlaces de encaminamiento y unión de protocolos sincronizada de acuerdo a estadísticas de consumo dentro de la red.
- Aplicar en el controlador un algoritmo que identifique un grupo óptimo de enlaces entre *switches* que se puedan apagar para reducir el costo de energía. Posteriormente, analizar la red para asegurar que cumpla con la demanda de tráfico o tomar decisiones para encender algún enlace clave.
- Usar un modelo de programación lineal binaria para aplicarlo al problema de gasto de energía. Esta propiedad demuestra las capacidades extendidas de programación directa que proporciona SDN. Es relativamente sencillo aplicar modelos matemáticos para minimizar o maximizar variables (en este caso relacionadas al consumo energético) que expandan o limiten los recursos de la red.

Consecuentemente, esta propuesta busca cubrir la inexistente capacidad de transitar desde la administración de un modelo centralizado a uno distribuido o hacia un modelo híbrido. Adicionalmente, el enfoque propuesto proporciona una vía para construir la relación inexistente entre entidades de red abstractas y modelos de programación.

La propuesta de este trabajo de investigación se compara contra SPAN para su validación debido a que este algoritmo permite distintas posibilidades y niveles de implementación. Así, es posible implentar SPAN sobre diferentes entidades virtuales y relacionar sus propiedades con el ente central de red. Además, este algoritmo de control de topologías es ampliamente utilizado y conocido.

3.2.2 Conclusiones

Actualmente, los alcances que predominan para obtener la eficiencia energética se basan en las capas de cada modelo de red. Así, en redes homogéneas encontramos soluciones específicas para cada capa, soluciones para redes de infraestructura, soluciones para redes inalámbricas, algoritmos de encaminamiento, capacidades unicast, capacidades multicast, virtualización, control de topologías y manejo del espectro electromagnético. También, hemos abordado los casos de obtener conciencia energética en redes heterogéneas cuyos alcances descansan en mecanismos de redes autogestinables, mecanismos por demanda y mecanismos sleep scheduling.

No obstante, la mayoría de soluciones actuales presentan penalizaciones importantes para garantizar la disponiblidad del conjunto de red o la actividad permanente de los nodos de red. También, muchas de las soluciones actuales limitan la compatibilidad con los diferentes modelos de red, el orquestamiento de la administración de múltiples tecnologías, la interacción fluida con las diferentes capas de un modelo de red, la gestión de topologías a través de diferentes WANETs, la integración de algoritmos y soluciones en redes infraestructura con soluciones en WANETs.

Observamos que la clasificación actual de operación para obtener conciencia energética está separada por enfoques y tecnologías; así mismo, cada enfoque presenta una serie de conflictos sobre sus beneficios y detrimentos. También, hemos visto que las redes heterogéneas presentan más dificultades al momento de contar con una conciencia energética. Así, la utilización de nuevos enfoques para combinar algoritmos y tecnologías en este ambiente mixto se vuelve sumamente oportuna. SDN proporciona una solución a este problema, ya que, por ejemplo, permite extender algoritmos de control de topologías utilizados en redes de sensores a grados más amplios de abstracción de tecnologías de redes como las WANETs.

Respecto a las arquitecturas de las propuestas, es obvio que la mayoría utiliza paradigmas cerrados al tipo de tecnología. Esto se produce ya que la separación de los planos de red no ha evolucionado con la rápidez como han evolucionado los algoritmos y protocolos de servicio dentro de las capas de operación de la red. Además, las soluciones que ya ofrecen una separación de planos confiable, como por ejemplo los enfoques SDN actuales, en su mayoría están centrados en las redes

de infraestructura, lo que limita la escalabilidad en ambientes de redes inalámbricas.

La solución propuesta en este trabajo de investigación se beneficia de la abstracción de control que permite SDN para extender procesos propietarios de redes de sensores a entidades de redes de grado de abstracción superior como las redes inalámbricas Adhoc. Por lo tanto, el control de la red evoluciona a tener propiedades que le permiten liberar las técnicas encapsaludas en cada tecnología para que interactúen entre diferentes capas de red. Nuestra propuesta utiliza dicho control de red para lograr ahorros energéticos. Nuestro algoritmo se va a comparar con SPAN permitiendo así analizar la influencia del tiempo de vida de la red al realizar la gestión del plano de control de la capa de red de forma distribuida o de forma centralizada.

Technology does feel and smell and look and act like a God.

John Modern

CAPÍTULO

4

Plano de Control Definido por Software en WANETs

Este capítulo expone los diferentes niveles de abstracción de nuestro enfoque para definir los procesos de toma de decisiones y comportamiento dentro de los despliegues de los futuros escenarios de red. Nuestra propuesta introduce y elabora un algoritmo al que hemos llamado *Cross-over-net* y que se ejecuta sobre un estilo de arquitectura de red que soporta ambientes centralizados y distribuidos.

Tal y como se ha visto en el capítulo anterior, las técnicas SDN no están totalmente desplegadas en WANETs, aunque las entidades abstractas relacionadasx con el conocimiento del comportamiento de WANETs si que pueden ser integradas con técnicas SDN en busca de, entre otras cosas, una eficiencia energética de la red [134]. Y esto es gracias a que para SDN los protocolos heterogéneos son diferentes abstracciones de comportamiento que pueden ser orquestadas por un lenguaje de programación común. Por lo tanto, es posible que protocolos heterogéneos puedan ser controlados con scripts de código que instancian a demanda sus prestaciones. No obstante, no existe un enlace entre estas capacidades y el consumo de energía eficiente. *Cross-over-net* está pensado para desempeñar esta responsabilidad y enlazar el conocimiento de planos separados de la red con el comportamiento por demanda de los servicios desde una perspectiva energética.

Así, la red se vuelve capaz de personalizar cada entidad de red abstracta tal y como personaliza una clase cada objeto instanciado en la programación orientada a objetos. Adicionalmente, las tecnologías SDN se están integrando con la virtualización en entornos WANETs. Por ejemplo, la virtualización de la función de red (NFV) virtualiza todas las abstracciones de control y de datos que gestiona SDN. Esto hace que los requerimientos de recursos lógicos y físicos sean utilizados por demanda lo que extiende a la red en sus capacidades de orquestación, programabilidad, escalabilidad dinámica, visibilidad, automatización, rendimiento, integración de servicios y portabilidad. Además, NFV incorpora todas las ventajas de la virtualización como la movilidad, la inversión reducida, la operación de ciclos de vida reducidos de los equipos y la alta capacidad de administración.

Consecuentemente, los avances en SDN y NFV han abierto una serie de posibilidades para optimizar el consumo energético de las redes, ya que la abstracción de conocimiento de la red y de los criterios de operación que antes solo se podían aplicar para cada tecnología de red, ahora pueden ejecutarse sobre redes heterogéneas [135]. Debido a esto *Cross-over-net* muestra flexibilidad ya que es posible desplegarlo en estos entornos.

El razonamiento de diseño que sostiene a *Cross-over-net* puede ser descrito como un grupo de propiedades que se aplican a elementos limitados dentro de una arquitectura de red. Este capítulo provee la visión del proceso sobre el cuál *Cross-over-net* ha sido concebido como un conjunto de propiedades de cada entidad de red para lograr una operación conciente del uso energético. El proceso de diseño sigue las siguientes definiciones:

1. Primeramente, describimos el contexto que se relaciona con *Cross-over-net* i.e. el alcance de la separación de los planos de red, su posicionamiento dentro de las capas de red y las estructuras del núcleo del algoritmo.

2. Luego, analizamos una arquitectura general sobre la cuál nuestro enfoque puede ser desplegado. Las principales conceptualizaciones de entidades físicas y entidades lógicas son descritas en esta etapa.

3. También, definimos las fases que se abstraen de la operación lógica *Cross-over-net*. Estas definiciones son: la lógica de las funcionalidades del algorit-

mo, el diseño del plano de control, el diseño del plano de datos, las construcciones de la base de conocimiento y entidades auxiliares.

4. Luego, describimos los principios y definiciones que rigen nuestro algoritmo i.e. las reglas para la definición de estados, las decisiones de comparación, la selecciones de rutas y los patrones entre entidades de red que se habilitan para su gestión.

5. Luego se establecen las capacidades de encaminamiento dentro del algoritmo y la definición de tratamiento de errores de encaminamiento. Estos alineamientos se describirán en la sección 4.5.

También, analizamos las consideraciones para la evaluación de nuestro enfoque, las cuáles incluyen: las propiedades del algoritmo propuesto y las extensiones del plano de control diseñado. Dichas consideraciones son descritas en la sección 4.6. Finalmente, el resumen del capítulo presenta una síntesis del mismo; así como, una discusión de las posibilidades del algoritmo propuesto.

4.1 Contexto de Ejecución

La principal fortaleza de nuestro enfoque subyace en el hecho de hacer disponible una representación del conocimiento de la red con las entidades de información que ya existen en la redes actuales e.g. tablas de estado, rutas, rangos de cobertura o indicadores de consumo energético. Openflow opera con tablas de emparejamiento a través del controlador. Esto facilita la integración con protocolos de encaminamiento conocidos como "orientados a tablas", como por ejemplo DSDV, OLSR, FSR y proporciona al controlador un conocimiento para construir un grafo topológico de la red completa. Por lo tanto, hace sentido considerar técnicas de control de topologías usando SDN para lograr ahorro de energía dentro de una red. Este apartado sigue con una descripción de los límites que rompe SDN dentro de nuestro enfoque. Luego se muestra la definición de los flujos de trabajo donde se ejecuta el algoritmo propuesto. Finalmente se describe el proceso central del algoritmo propuesto con el fin de entender las principales ideas del marco de referencia para su ejecución.

4.1.1 Alcance del Enfoque SDN

Actualmente existe un aislamiento de los marcos de ejecución y trabajo de SDN, porque esta tecnología fue creada en un inicio exclusivamente para redes de infraestructura fija. Sin embargo, los problemas de compatibilidad en otros enfoques de red se han ido superando por lo que actualmente es posible desplegar soluciones SDN en una gama amplia de tecnologías de red. Así, según su estado del arte, el alcance del enfoque SDN abarca desde redes de infraestructura hasta las redes de sensores inalámbricas. El requisito primordial para que una red (ya sea de infraestructura o inalámbrica) sea compatible con SDN es su soporte a direccionamiento IP.

Como muestra la figura 4.1, SDN abstrae capas de diferentes modelos de red independientemente de las tecnologías y protocolos que rigen a dichas capas. Así, la nueva abstracción puede desacoplar el control de los modelos de red y administrarlo bajo un modelo común. Además, los mecanismos exclusivos que son utilizados en un modelo específico para organizar la red pueden extenderse automáticamente a todos los demás modelos de red que estén bajo la gestión SDN. Por ejemplo, bajo las gestión definida por software es posible que una WSN móvil se integre en los

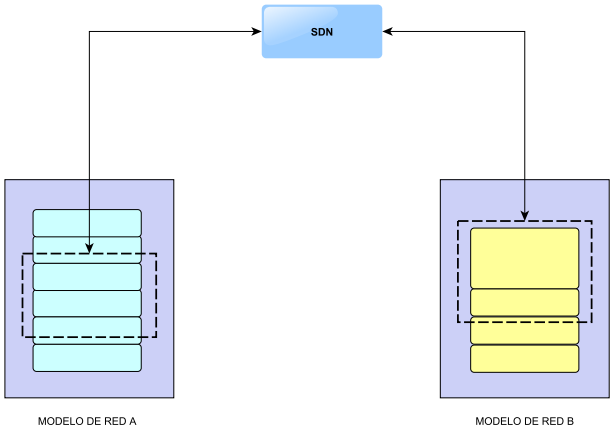


Figura 4.1: Abstracción SDN de capas en diferentes modelos de red.

requisitos de servicios de una WMN estática aunque sus protocolos subyacentes operen en modelos totalmente diferentes.

SDN trabaja con abtracciones de una o varias capas de modelos de red. Así, el conocimiento reservado a un modelo de red específico se habilita para aplicarse de forma ubicua dentro de cualquier modelo de red desde el plano de control. El plano de control puede estar en uno o varios dispositivos con la capacidad requerida; de esta forma, se minimiza el riesgo de un punto de fallo. El control está centralizado a nivel de abstracción pero está distribuido a nivel real-físico".

4.1.2 Núcleo de Ejecución

El algoritmo presentado, al que hemos llamado *Cross-over-net*, opera entre la capa MAC y la capa de encaminamiento como lo muestra la Figura 4.2. Dicho algoritmo puede ser considerado como una modificación complementaria a la lógica de encaminamiento.

El controlador construye dinámicamente y localmente los grafos que contienen la información de *vecinos* y *vecinos de vecinos* para cada nodo y así analizar su aptitud para convertirse en *coordinador*. En nuestro alcance, el controlador maneja una red interna virtual antes de enviar las actualizaciones a los nodos, de esta forma, los únicos nodos que recibirán un mensaje de actualización son los que sufren un

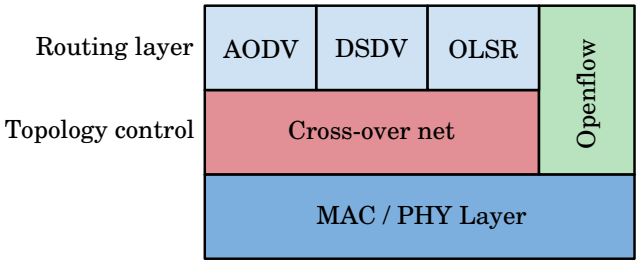


Figura 4.2: Capas de operación de Cross-over-net y Openflow.

cambio. Al utilizar la red interna virtual se logra no inundar la red de mensajes de actualización que no son necesarios y por consiguiente ahorrar esa energía. El flujograma que describe los procesos principales de nuestro algoritmo se muestra a continuación:

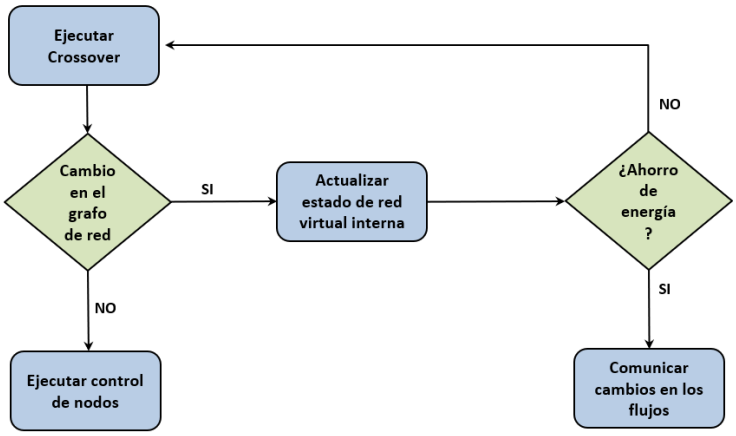


Figura 4.3: Contexto general del algoritmo.

La red interna virtual es una abstracción del grafo de red dentro del controlador. El detalle del funcionamiento de la red interna virtual se describe en la sección 4.3.2. Entonces, con este nivel de conocimiento de la red se pueden utilizar algunos conceptos de centralidades de la teoría de grafos y de esta forma tomar decisiones más informadas.

4.1.3 Núcleo del Algoritmo de Conservación de Energía

Buscamos ofrecer a la red un mecanismo de conservación de energía de sus nodos, y al mismo tiempo un esquema de balanceo de carga de comunicación en la construcción de los nodos. El núcleo del algoritmo propuesto, al que hemos denominado *Cross-over-net* se presenta en la figura 4.4 donde n es el número de nodos de la red y *nodo actual* representa un nodo en cada iteración del proceso.

Dado que dentro del paradigma SDN el controlador tiene una visión de la red completa en sus tablas de control, este puede realizar cada cierto tiempo un *barrido* a la situación completa de la red solamente consultando sus tablas internas. Luego, el controlador es capaz de determinar cuáles nodos deben ser **coordinadores** y cuáles **no coordinadores** en ese determinado momento. Esta decisión, como se puede apreciar en el núcleo del algoritmo anterior, se basa en los criterios de utilidad de los nodos.

El núcleo del algoritmo consulta a cada nodo si es coordinador o no. Si no lo es, el algoritmo calcula los pares adicionales de nodos que podrían ser conectados si el nodo evaluado se convierte en coordinador. Si el nodo provee pares conectados adicionales entonces su condición se cambia a coordinador en la red interna virtual para probar el cambio antes de pasarlo a la red real. Un análisis similar se sigue para quitar nodos coordinadores. Luego, las estructuras dinámicas del controlador son reiniciadas y se procede a evaluar la eficiencia energética alcanzada en la red interna virtual, así como, otros análisis de decisión. Finalmente, el controlador coloca los cambios apropiados en la red real.

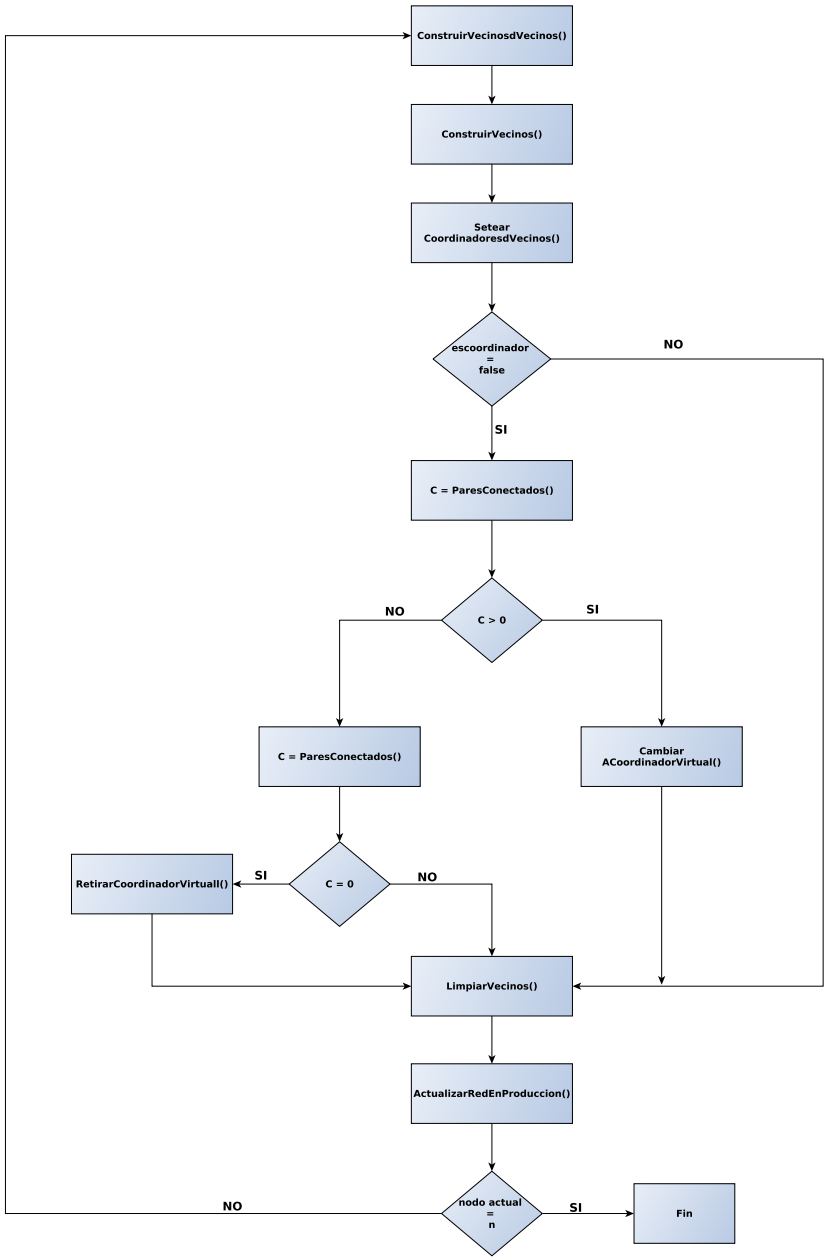


Figura 4.4: Proceso central del algoritmo propuesto.

4.2 Arquitectura General

Nuestro algoritmo está posicionado entre un enfoque claramente centralizado y un enfoque totalmente distribuido. Este estado intermedio habilita la capacidad de administrar la inteligencia de la red a través de pasarelas controladoras a nivel de capa física y una abstracción de control a nivel de lógico. Como resultado, los nodos de red se olvidan de tareas complejas y solamente ejecutan tareas de reenvío disminuyendo el mantenimiento de mensajes entre los nodos y por consiguiente prolongando el tiempo de vida de la red en términos de consumo energético.

Asumimos que el rango de transmisión es al menos el doble al rango de detección. Así, es posible centrar el enfoque en el rango de conectividad entre vecinos, porque está probado que si el rango de tranmisión es al menos el doble que el rango de detección obtenemos que cobertura implica conectividad [136]. Como resultado, los ahorros energéticos pueden ser obtenidos minimizando los costos de transmisión entre nodos dentro de un vecindario.

Como se muestra en la Figura 4.5, nuestro enfoque coloca la inteligencia central en la nube de internet usando las características de SDN. Este plano de control abstracto **(inteligencia central)** administra una WANET para aplicaciones IoT a través de una o más pasarelas controladoras. La pasarela controlador es una extensión del plano de control abstracto; de hecho, puede ser considerada como la posición física del panel de control dentro de la WANET. Nuestros experimentos han considerado diferentes escenarios con diferente número de pasarelas controladoras, ya que, las rutas para llegar a la abstracción central del panel de control están relacionadas con la posición de una pasarela controlador.

Desde una perspectiva lógica, la solución propuesta provee una capa central de control que orquesta múltiples capas de WANET para diferentes comportamientos. De este modo, la red está lista para cambiar, “on the run”, el tamaño y la cantidad en cualquier momento. Además, la red obtiene una administración unificada y automatizada para miles de dispositivos. Las características clave de la arquitectura general de *Cross-over-net* se resumen como sigue:

- **Abstracción de panel de control:** La inteligencia central. Esta entidad toma las decisiones críticas respecto a los comportamientos de la red, políticas de encaminamiento y conocimiento general de la red. También, regula el tiempo

periódico del proceso *CheckNet* que será descrito en detalle en la sección 4.3.1.

- **Abstracción del panel de datos:** Está a cargo de simplificar las tareas de reenvío de paquetes. El plano de datos en los nodos está limitado a emparejar paquetes entrantes, si el paquete se empareja con una entrada de flujo en una tabla de flujos (proporcionada por el controlador), el correspondiente grupo de instrucciones se ejecuta; de lo contrario, el paquete se devuelve al controlador o el plano de datos deshecha el paquete.
- **Comportamientos de red definidos por software:** En cualquier momento, la red es capaz de controlar diferentes comportamientos, cambiando la columna vertebral de coordinación en cada capa conceptual de la red o unir todos los comportamientos en uno solo.

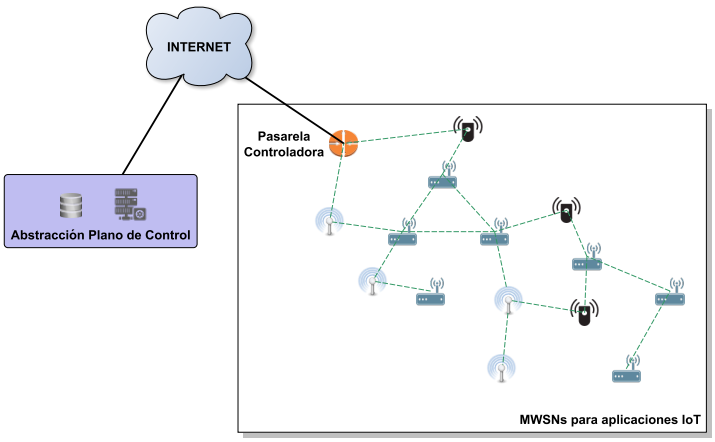


Figura 4.5: Representación física de la arquitectura.

Las pasarelas controladoras y el plano de control pueden ser administrados por un framework SDN como por ejemplo POX. Los controladores POX proporcionan un framework para comunicar la tecnología SDN usando Openflow dentro de un ambiente de lenguaje de programación Pyhton. También existen plataformas como OpenDayLight para migrar actuales de red a una arquitectura de red SDN basada en Linux. La arquitectura anteriormente expuesta se acopla al uso de cualquiera de estas tecnologías.

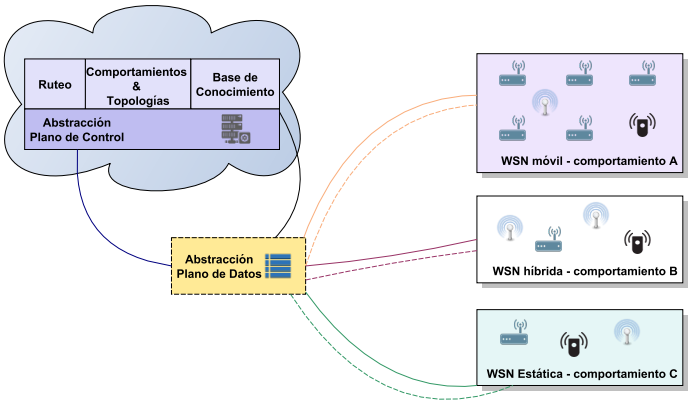


Figura 4.6: Representación lógica de la arquitectura.

4.3 Diseño

El diseño de la arquitectura debe considerar la operación dentro de un alcance intermedio. La idea es operar entre una visión altamente centralizada y una visión distribuida.

4.3.1 Lógica de Funcionamiento

La lógica de funcionamiento del algoritmo propuesto se puede encapsular en cuatro fases: inicialización, revisión de estado de la red (CheckNet), transmisión, y revisión de control (ControlCheck), como muestra la Figura 4.7. Cada nodo y controlador se autogestionan en la fase de inicialización construyendo todas las estructuras internas posibles con la información disponible de las capas MAC, capa física y de vecindarios individuales. Posteriormente, se ejecutan los procesos de descubrimiento de servicios de la red y se pasa a un bucle de tareas coordinadas de: revisión, control y transmisión.

Usamos el canal de control para obtener el grafo completo de la topología de la red en el controlador. También utilizamos los detalles de la información de la situación general e individual de cada nodo. El controlador ejecuta periódicamente, un barrido en sus tablas de control para determinar los cambios en el grafo de red y el subgrafo de nodos clusters.

Las tareas de revisión de la red (CheckNet) se procesan en el controlador (o los controladores) y tienen como propósito central ejecutar de forma periódica el algoritmo propuesto *Cross-over-net*, con la información obtenida en las revisiones de la red. Al mismo tiempo, se incrementa la base de conocimiento del plano de control y se toman las decisiones pertinentes para la actualización de las tablas de flujo de los nodos y por consiguiente el comportamiento de la red. Este proceso considera en todo momento sensibilidades calculadas para el óptimo consumo de energía dentro del paradigma utilizado.

Durante el estado de transmisión, la red hace uso de una administración de errores para casos de desconocimiento de flujos de encaminamiento, pérdida de mensajes, datos incompletos, etc. Estos problemas serán abordados mediante una serie de reglas de emparejamiento y cálculos de algoritmos de error que son comunicados al controlador central.

Finalmente, tareas adicionales de mantenimiento sobre el canal de control se hacen cargo de procesos de cola, movilidad de tablas de información, petición de servicios o descubrimiento de nuevos servicios.

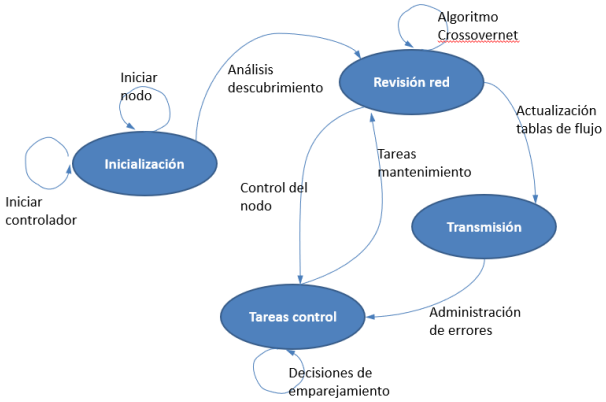


Figura 4.7: Lógica de funcionalidad.

En caso de no existir cambios en la red, el controlador se limita a las tareas de control de los nodos.

4.3.2 Diseño de Plano de Control

El controlador que sugiere nuestro algoritmo *Cross-over-net* está conformado por cuatro entidades abstractas como se muestra en la Figura 4.8. La primera entidad es la **red de producción** donde se encontrará toda la información de comunicaciones del ambiente real que se controla. Esta información incluye **estado de la red**, **coordinadores de la red** y **estado de vecindarios** de cada nodo.

La segunda entidad es similar a la anterior. Esta guarda toda la información de la red de producción pero la utiliza como un **ambiente de pruebas y desarrollo** para analizar los resultados de la revisión y control de la red antes de inundar la red de producción con mensajes. La idea es que los momentos que no generan cambios y los procesos potenciales a fallar o sin una finalización clara no generen gastos energéticos adicionales.

La entidad interna de red virtual guarda toda la información de la red de producción pero es usada como un ambiente de prueba y desarrollo para analizar los

resultados de las actualizaciones de control y revisión antes de efectuar los cambios en la red de producción. El objetivo es minimizar costos de energía adicionales debidos a potenciales fallos de procesos detectados. La entidad de red interna virtual consiste de 2 estructuras que contienen el estado de la red de producción. El estado de la red puede ser descrito con una estructura que guarde los campos de *vecinos* y *vecinos de vecinos* de cada nodo y una estructura que informa de los coordinadores de la red, la cuál consiste en una lista indicando cuáles nodos son coordinadores en un punto particular del tiempo.

Una tercera entidad abstracta es la **librería de grafos de red**. Esta entidad conserva los algoritmos, APIs, bases de datos que generan un conocimiento del grafo de red (si es necesario en diferentes momentos) con el fin de contar con un conocimiento en la revisión de la red para una toma de decisiones más informadas. Por ejemplo, en estas librerías de grafos se puede experimentar con técnicas de análisis de centralidades, leyes de poder, cliques etc. [137] y aplicar estos modelos a los nodos de la red con el fin de añadir más inteligencia a la **base de conocimiento** del controlador para predecir comportamientos de la red y adelantarse a cambios logrando ahorros energéticos.

Por último tenemos los **módulos dinámicos**, que son un conjunto de depósitos y procesos que se ejecutan cada vez que se hace una revisión de la red para obtener información personalizada y singular de cada componente de la red. Estos módulos están en constante movimiento en un ciclo de: creación, análisis, extracción de información y reinicio.

4.3.3 Diseño de Plano de Datos

La Figura 4.9 muestra las estructuras internas que nuestra propuesta sugiere para los nodos de la red que administran el plano de datos.

Las **tablas de flujo** son regidas por el controlador para que el nodo realice el emparejamiento de rutas definido por el protocolo Openflow. La información de sus **vecinos** y **coordinadores** a su alcance es necesaria para facilidades en la administración de la movilidad de nodos. Por último, las **estadísticas de control** son empleadas en las tareas de mantenimiento y manejo de errores.

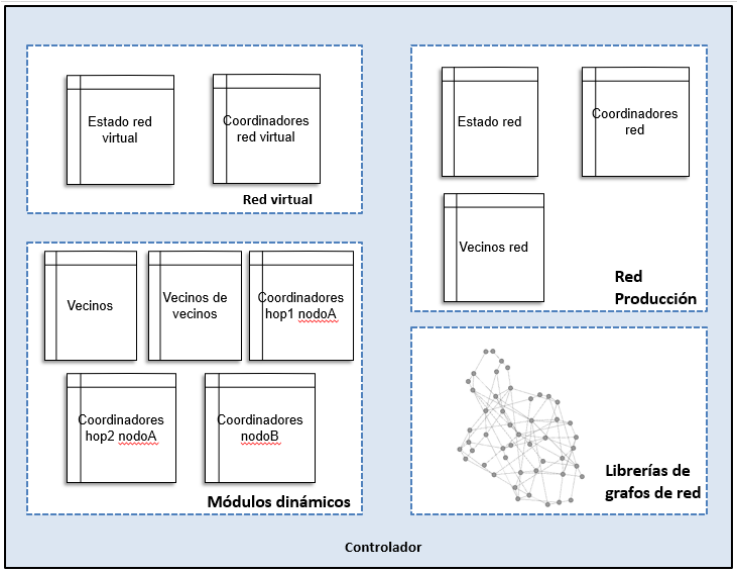


Figura 4.8: Diseño de la abstracción plano de control.

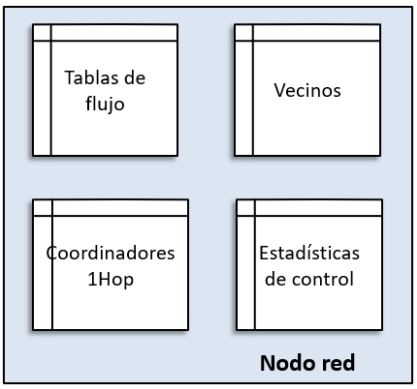


Figura 4.9: Diseño de la abstracción plano de datos.

4.3.4 Base de Conocimiento

El plano de control administrado por el controlador central de la red (o controladores) es capaz de mantener una *base de conocimiento* que va especializándose a medida que recibe retroalimentación de las instrucciones y procesos ejecutados para las tareas de actualización y control de la red en producción.

Con cada iteración de control y revisión de red, el controlador recibe información clave de cada nodo como el cálculo de su utilidad, los pares de nodos adicionales que podrían conectarse a la columna vertebral de comunicación, las rutas más cortas de encaminamiento desde una fuente y un destino, sus centralidades dentro del grafo de red, nodos más utilizados, vecindarios con más gasto energético y decisiones tomadas en determinado tiempo. Toda esta información puede afinar una *base de conocimiento* que se puede gestionar desde el plano de control con el objetivo de dotar de mayor inteligencia el comportamiento de la red; por ejemplo, el plano de control podría predecir tendencias de movilidad en base a modelos probabilísticos históricos o establecer modos de encaminamiento de acuerdo a calidades de servicio en vecindarios específicos [138].

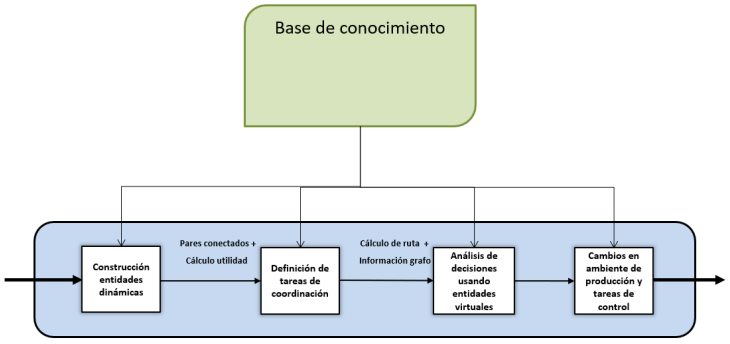


Figura 4.10: Proceso de retroalimentación a la base de conocimiento del controlador.

4.3.5 Diseño de Entidades Auxiliares

Cross-over-net se auxilia de las estructuras de vecinos, lista de coordinadores, tablas de flujo y control estadístico que se gestionan desde el plano de datos. En la

Figura 4.11 se muestran los detalles de los campos que construyen dichas estructuras. Las estructuras no tienen una relación entre si ya que los procesos que las utilizan son capaces de extraer el conocimiento que necesitan desde la información puntual que las estructuras administran. Los campos que construyen la información puntual de las estructuras de vecinos y lista de coordinadores son:

- **Vecinos:** Esta estructura construye la información de los campos dirección del vecino $< direccionvecino >$, y si el vecino es coordinador $< escoordinador >$. Con el control de está información cada nodo es capaz de tomar decisiones de reenvío dentro de su vecindario. También, con esta información se mantienen las tablas de flujo locales.

- **Lista de coordinadores:** Esta estructura posee la información que indica la dirección de los vecinos que tienen las funciones de coordinación $< direccioncoord >$. Al conectar la información de esta estructura con todos los nodos de la red se crean nuevas abstracciones de conocimiento que son útiles para el plano de control central de la red.

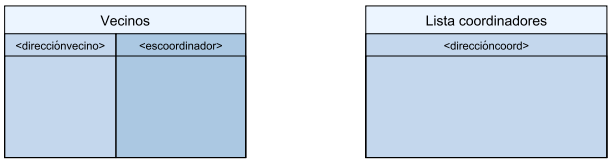


Figura 4.11: Estructuras del plano de datos.

El plano de control administra el mantenimiento de estás estructuras mediante los mensajes CheckNet y ControlCheck. Al plano de control central de la red se ùede acceder mediante un controlador o varias pasarelas controladoras. El tiempo en el cual la información de estas estructuras se vuelva obsoleto dependerá de la posición y distancia entre estas estructuras y las entidades controladoras dentro de la red.

Por otra parte, el plano de control se apoya en las estructuras vecinos de vecinos, lista de coordinadores nodo A Hop 1 ($< ListacoordnodoAhop1 >$), lista de

coordinadores nodo B ($< ListacoordnodoB >$) y lista de coordinadores nodo A Hop 2 ($< ListacoordnodoAhop2 >$).

La Figura 4.12 muestra los detalles de los campos que construyen dichas estructuras. La estructura vecinos de vecinos es la estructura madre de la que se construyen las demás. Por lo tanto, existe una relación entre la estructura vecions de vecinos y las estructuras lista de coordinadores nodo A Hop 1 y lista de coordinadores nodo B. La estructura lista de coordinadores nodo A Hop 2 nace a partir de la entidad vecinos de vecinos, pero tiene una relación directa con la entidad lista de coordinadores nodo A Hop 1. Los campos que construyen la información de las estructuras mencionadas son:

- **Vecinos de vecinos:** Esta estructura posee la información que indica la dirección de un vecino $< direccioncoord >$, la dirección del vecino de un vecino $< dirvecinodevecino >$, y si el vecino del vecino es coordinador $< escoordinador >$.

- **Lista de coordinadores nodo A Hop 1:** Esta estructura construye la información de los campos dirección de coordinador a un salto con respecto al nodo A $< direccioncoordAhop1 >$.

- **Lista de coordinadores nodo B:** Con esta entidad conocemos las direcciones de la lista de coordiandores al alcance del nodo B $< direccioncoordB >$.

- **Lista de coordinadores nodo A Hop 2:** Esta estructura construye la información de los campos dirección de coordinador a dos salto con respecto al nodo A $< direccioncoordAhop2 >$.

La estructura de vecinos de vecinos se construye a partir de la entidad de estado de red de la red de producción. Los coordinadores a 2 saltos con respecto al nodo A se construyen a partir de analizar la lista de coordinadores de un vecino de vecino del nodo respectivo. Las estructuras son utilizadas de manera conjunta en cada iteración del proceso CheckNet. El conocimiento aportado por esta estructura de manera conjunta proporciona las bases de las decisiones relacionadas a la utilidad de un nodo dentro de su vecindario.

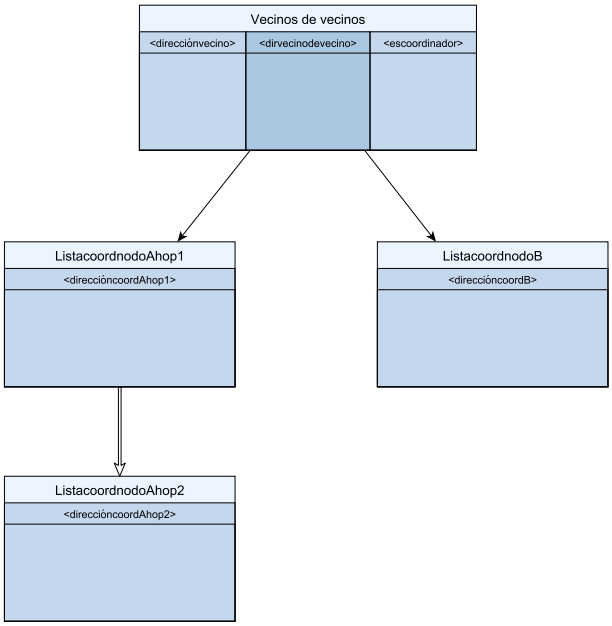


Figura 4.12: Estructuras dinámicas.

La finalidad estas estructuras dinámicas es construir una abstracción que represente las relaciones de un nodo dentro de su vecindario a dos saltos de distancia. La regla de implicación de una relación entre los dos nodos es sencilla: si existe un coordinador común entre la lista de coordinadores del nodo B y alguna de las listas de coordinadores del nodo A (ya sea a un salto o a dos saltos); el nodo A y B tienen una relación de comunicación; de lo contrario, el nodo A y el nodo B no pueden comunicarse a dos saltos de distancia. Así, es posible construir un minigrafo del vecindario de un nodo en un momento determinado. Esta información es crítica para determinar el conocimiento del mejor encaminamiento para que dos nodos se alcancen entre si.

Finalmente, la asignación de nodo A y nodo B cambia dinámicamente en cada revisión global al estado de la red y en cada iteración nodo por nodo. Las estructuras son reiniciadas en cada iteración del proceso de revisión de red. El tiempo del ciclo de este proceso es configurable.

4.4 Directrices de Operación

Los principales comportamientos de *Cross-over-net* están gobernados por un conjunto de principios y definiciones de estado. Por lo tanto, nuestro algoritmo conoce como tratar con el problema de consumo de energía en cada fase de la lógica operacional.

Esta sección está conformada por la descripción de abstracciones del plano de control. Luego, presentamos los principios y definiciones que gobiernan nuestro algoritmo. Después, describimos el proceso que sigue nuestro algoritmo para comparar utilidades entre vecinos. Finalmente, analizamos como se seleccionan rutas hacia pasarelas controladoras que existan en la red. De esta forma, clarificamos la base de reglas de nuestro alcance siguiendo un orden de secuencia igual al que se ejecuta en *Cross-over-net*.

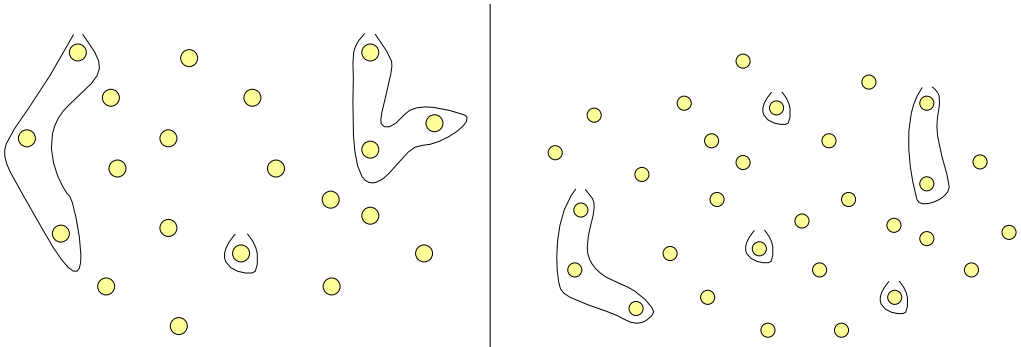
4.4.1 Abstracciones del Plano de Control

Con el despliegue de SDN se abren nuevas posibilidades en relación a los grados de abstracciones de operación que se encuentran en la red. Así, en nuestros despliegues es posible crear abstracciones programables y luego definir si esas abstracciones operarán de forma individual, combinada, estáticas o dinámicas. Además, el plano de control es capaz de gestionar todas las abstracciones independientemente de como sean definidas.

En nuestra arquitectura hemos separado el plano de control en dos capas. Hemos construido una capa lógica y una capa física para gestionar la abstracción del plano de control central. De esta forma es posible contar con un control centralizado pero que puede ser distribuido, o central tanto a nivel lógico como a nivel físico. Nuestra propuesta utiliza un nivel lógico central que se ubica en la nube y un nivel físico distribuido representado por las pasarelas controladoras en la red.

La figura 4.13 muestra diversas posibilidades de distribuir la abstracción del plano de control a nivel físico. Hemos llamado a los nodos que poseen acceso al plano de control como pasarelas controladoras. Las pasarelas controladoras dan acceso a un plano de control ubicado en internet (la nube). El grafo de la red de

producción es construido con los nodos que tengan una ruta a una de las abstracciones del plano de control a nivel físico; por lo cuál, la posición y el número de estas abstracciones incide en la forma en que la red utiliza sus recursos.



(a) 20 nodos (b) 30 nodos

Figura 4.13: Abstracciones distribuidas del plano de control central.

Así, el criterio para la selección del número y posición de las pasarelas controladoras depende de los requerimientos de red del caso de uso específico. No sabemos como cambiará un grafo de red en el tiempo para calcular la mejor posición de las abstracciones de control; no obstante, en las situaciones donde es posible conocer el espacio que ocupará una red; lo ideal es colocar las pasarelas controladoras al centro y en la periferia del área. También, las pasarelas controladoras pueden definirse como estáticas o móviles dentro de la red.

Cuando las pasarelas controladoras son nodos móviles es cuando el sistema es más aleatorio; ya que, cuando las pasarelas controladoras son estáticas se conoce el espacio específico donde tienen cobertura y por consiguiente el espacio donde se crearán los grafos de red. Por otro lado, cuando las pasarelas controladoras son móviles; los grafos de red que se construyen a su alcance también son móviles.

Las pasarelas controladoras poseen conexión estable a internet para acceder al plano de control (conocimiento central) que está en la nube. En consecuencia, dichas pasarelas controladoras siempre conocen el estado de la red de producción y las decisiones analizadas del plano de control central. En caso de perder conexión con el plano de control; las pasarelas controladoras son capaces de comportarse como un red de malla Adhoc mientras se reestablece la conexión al plano de control central.

4.4.2 Definición de Estados

Dada una red inalámbrica, la red completa es descrita con un grafo $G = (V, E)$, donde cada enlace es representado por la distancia euclídea entre cada par de nodos. Luego, seleccionamos un subconjunto de nodos para formar la columna vertebral de la red $G1 = (V1, E1)$, similar a un grupo de coordinadores dominante (*Cluster domain Se*t - CDS). Esta columna vertebral es capaz de mantener la conectividad de la red. La construcción de dicha columna vertebral es gobernada por procesos de selección o retiro de coordinadores, los cuáles consideran el nivel de energía del nodo y su utilidad para conectar pares adicionales de nodos entre sus vecinos.

Una vez la inicialización de la red se ha estabilizado; el algoritmo selecciona los nodos coordinadores basado en la utilidad de cada nodo, la cuál viene dada por:

$$utility = (1 - {}^{E_r}/_{E_t}) + (1 - {}^{C_i}/_{\binom{N_i}{2}}) \tag{4.1}$$

donde E_r denota la energía disponible del nodo, E_t denota el total de energía del nodo a su máxima capacidad, C_i representa el número de pares adicionales de nodos entre sus vecinos que pueden conectarse si el nodo i se convierte a coordinador y envía paquetes. Finalmente, N_i denota el número de vecinos para el nodo i.

Por simplicidad, hemos considerado el servicio de descubrimiento de la red en un módulo de control separado para cada nodo. Las principales definiciones de *Cross-over-net* son las siguientes:

Definición I. En una primera etapa, el controlador de la red inicializa sus estadísticas y estados construyendo los grafos de vecinos para cada nodo usando la información en su rango de comunicación. El par de vecinos directos i y j es denotado por $NN_{(i,j)}$:

$$NN_{(i,j)} = DN_{(i,j)} < R_i \tag{4.2}$$

Donde $DN_{(i,j)}$ es la distancia entre nodo i y el nodo j. R_i es el rango de transmisión del nodo i. Este proceso es calculado para cada nodo i en rango $(0, n)$. Dicha n es el número total de nodos en la red.

Definición II. Un módulo de descubrimiento calcula la distancia Euclídea de cada par de nodos y la registra en una matriz de distancias para propósitos de estadística y control. El controlador calcula la distancia de cada par de nodos usando:

$$DN_{(i,j)} = \epsilon_{(i,j)} \tag{4.3}$$

El controlador registra la distancia desde el nodo i al nodo j denotándola como $DN_{(i,j)}$. El controlador construye este registro para cada nodo i en el rango $(0, n)$ y para cada nodo j en el rango $(0, n)$; n es el número total de nodos en la red. Si los nodos conocen su posición x y su posición y respecto a un punto de referencia, el controlador también registra esta información.

Definición III. Luego se procede a construir el estado global de la red y la lista de coordinadores. Inicialmente, la longitud de la estructura de red de vecinos L_{NN} es definida como:

$$L_{NN} = \sum_{i=0}^{n_n n} NN_{(i)} \tag{4.4}$$

Luego, usamos este límite para calcular el estado global de la red que indica el nodo i, vecino j y vecino de vecino k de acuerdo a las ecuaciones siguientes:

$$NT_a = NN_{(j)} \tag{4.5}$$

$$\forall NT_a : SN_{(i,j)} = NN_{(i,j)} \tag{4.6}$$

$$\forall NT_a : SN_{(i,k)} = NN_{(k)} \tag{4.7}$$

Donde NT_a es el nodo evaluado actual; $N_{(i,j)}$ denota un par de vecinos directo de un nodo en la estructura del estado de la red; $NN_{(i,j)}$ es un par de vecinos directo de un nodo en la estructura de vecinos de red; $N_{(i,k)}$ representa el vecino de vecino k para el nodo i en la estructura de estado de la red y $NN_{(k)}$ es el vecino k en la estructura vecinos de red. Obtenemos k evaluando cada nodo vecino j dentro de la misma estructura de vecinos de red $NN_{(i,j)}$ en una iteración previa anidada.

Definición IV. Periódicamente, el controlador *(plano de control)* revisa la red con el objetivo de construir un grafo de red nuevo y un nuevo CDS. Esta revisión de red puede ser ejecutada usando el canal de control requerido en la operación del protocolo Openflow. La longitud de la estructura de estado de red L_{SN} y la longitud de la estructura vecinos de vecinos local L_{LNN} es definida de acuerdo a las ecuaciones 4.8 y 4.9 respectivamente:

$$L_{SN} = \sum_{i=0}^{n_{st}} SN_{(i)} \tag{4.8}$$

$$L_{LNN} = \sum_{i=0}^{n_{lnn}} LNN_{(i)} \tag{4.9}$$

Donde n_{st} denota los nodos totales en la estructura de estado de la red; $SN_{(i)}$ indica un nodo en la estructura del estado de red; n_{lnn} es el total de nodos en la estructura vecinos de vecinos local y $LNN_{(i)}$ indica un nodo en la estructura vecinos de vecinos local.

Entonces, dejar que $SN_{(i,k)}$ represente un par formado por el nodo vecino de vecino k para el nodo i en la estructura de estado de red. Así, la estructura vecino de vecino local es designada de la siguiente forma:

$$LNN_{(i,j)} = SN_{(i,k)} \tag{4.10}$$

Considerando la iteración del nodo i en rango $(0, LSN)$.

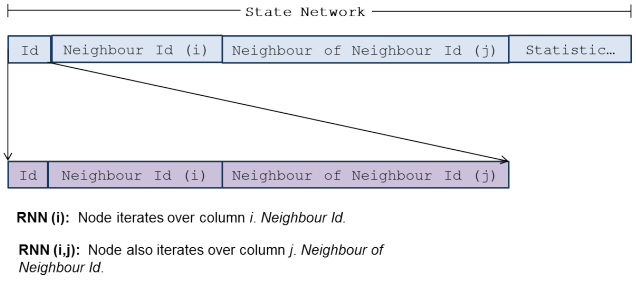


Figura 4.14: Estructura vecino de vecino.

Luego, la estructura vecinos locales puede ser calculada por:

$$LN_{(i)} = LNN_{(i)} \tag{4.11}$$

Cumpliendo que $LNN_{(i)} <> LNN_{(i)}$ y para cada nodo i en rango $(0, L_{LNN})$. Por otro lado, el controlador calcula los potenciales pares conectados C de cada nodo i usando:

$$L_{LN} = \sum_{i=0}^{n_{lt}} LN_{(i)} \tag{4.12}$$

$$C = SC_{(LN_{(i)}, LN_{(i+1)})} \tag{4.13}$$

Así, el controlador calcula el largo de vecinos locales, el cuál es denotado por L_{LN} para usarlo como un límite para la iteración del nodo i dentro de la expresión de coordinadores compartidos $SC_{(LN_i)}$. También, el controlador determina si el nodo es útil UN siguiendo:

$$U_N = UN > LNC_{(i)} \tag{4.14}$$

Donde UN es la utilidad del nodo dada por la ecuación 4.1 y $LNC_{(i)}$ indica la utilidad del grupo de sus vecinos locales. Esta comparación se realiza contra cada nodo i en rango $(0, L_{LN})$.

Finalmente, siempre que un nodo transmite un mensaje acorde a sus tablas de flujo *(plano de datos)* se sigue una simple regla: si el destino es un vecino, el nodo envía el paquete directamente, de otra forma, el nodo envía el paquete a un coordinador vecino.

4.4.3 Comparación Utilidad Entre Vecinos

La figura 4.15 muestra el diagrama del proceso que sigue nuestro algoritmo para la asignación de utilidades de cada nodo. En dicha figura, n es el número de nodos de la red, *nodo actual* representa un nodo en cada iteración del proceso y *nodo interno* es el nodo actual en cada iteración dentro de la entidad interna de red virtual. El plano de control ejecuta la asignación de utilidades en cada iteración del proceso *CheckNet*. El proceso de asignación de utilidades es el siguiente:

- En primer lugar, el plano de control construye la tabla de estado general de la red y la estructura general de vecinos de la red.
- Posteriormente, se construyen las estructuras dinámicas necesarias para calcular las interacciones de los diferentes vecindarios.
- Después, el plano de control verifica los pares conectados de cada nodo; este proceso se ejecuta comparando los coordinadores que comparten los nodos seleccionados en cada iteración; dicha comparación de coordinadores es posible gracias a la creación de las estructuras dinámicas de la fase anterior.
- Luego, el algoritmo calcula la utilidad del nodo actual en la iteración y la asigna en la red virtual antes de registrarla en la red de producción.
- Finalmente, el plano de control limpia las estructuras dinámicas y procede a asociar las utilidades a los nodos correspondientes en la red de producción.

El conocimiento creado durante la asignación de utilidades es un ejemplo de la capacidad del plano de control para conocer los detalles de la red completa. Con este enfoque se habilita la posibilidad de registrar tanto los grafos de vecindarios así como las utilidades de cada vecino en un determinado tiempo; en consecuencia, el plano de control es capaz de extender su conocimiento analizando patrones históricos de cambio entre vecindarios. Además, el plano de control puede gestionar algoritmos predictivos basados en los patrones de asignación de utilidades o las implicaciones para la red debido a proyecciones de consumo energético.

Nuestro enfoque ejecuta todos los cálculos mencionados en el plano de control central. En un ambiente de control distribuido no es posible construir las abstracciones de conocimiento mencionadas en el parráfo anterior. Además, futuras técnicas de programabilidad para análisis de datos son fácilmente desplegadas en un plano de control central que gestiona varias tecnologías distintas.

La asignación de utilidades es necesaria para contar con el conocimiento que permite ejecutar el proceso de comparación de utilidades dentro de los vecindarios. La figura 4.16, muestra el proceso para ejecutar la comparación de utilidades entre nodos. En dicha figura, n es el número de nodos de la red, *nodo actual* representa

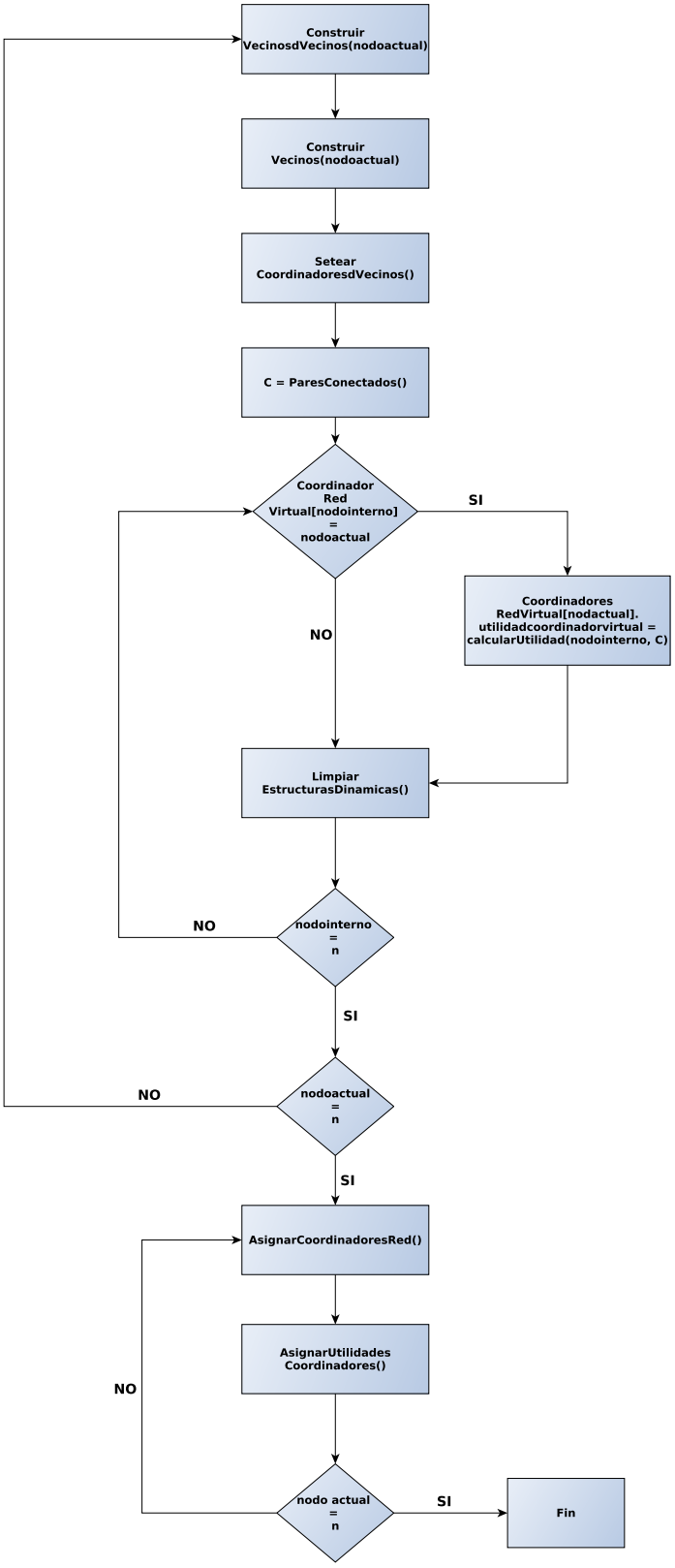


Figura 4.15: Proceso de asignación de utilidades.

un nodo en cada iteración del proceso y *nodo interno* es el nodo actual en cada iteración dentro de la entidad interna de red virtual.

Al igual que la asignación de utilidades, el proceso de comparación de utilidad lo ejecuta el plano de control central. El proceso de comparación de utilidades es el siguiente:

- En primera instancia, se construyen las estructuras dinámicas.
- Posteriormente, se calculan los pares conectador de cada nodo.
- Después, el plano de control verifica la utilidad del nodo actual para registarla en el tiempo.
- Luego, por cada nodo de la red se compara su utilidad con cada uno de sus vecinos coordinadores.
- Finalmente, si la utilidad del nodo actual es menor que la utilidad de un vecino coordinador se establece que el nodo actual no es útil.

La aplicación de un enfoque SDN es lo que permite el registro de asignaciones y comparación de utilidades para su análisis a diferentes niveles de conocimiento. Una visión de control distribuido solamente proporciona conocimiento local a nivel de nodo. Los nodos son más independientes en su toma de decisiones pero son más díficiles de entender y de programar su comportamiento. Además, un entorno de control distribuido no permite asociar patrones de comportamiento con conocimiento general de la red; ya que dichos patrones se pierden en la interacción de las decisiones locales tomadas por los nodos.

La visión de control central simplemente ignora a los nodos cuando estos salen de la cobertura del grafo general de la red; no obstante, los nodos pueden entrar y salir del grafo de red las veces que sean necesarias. En una visión de control distribuido no existe un grafo general de la red por lo que los nodos operan sin preocuparse de entidades de abstracción superiores; como resultado, una visión de control distribuido es más robusto ante la movilidad de los nodos y ante la fracturación de la red cuando las redes suben el número de sus nodos ($n > 50$).

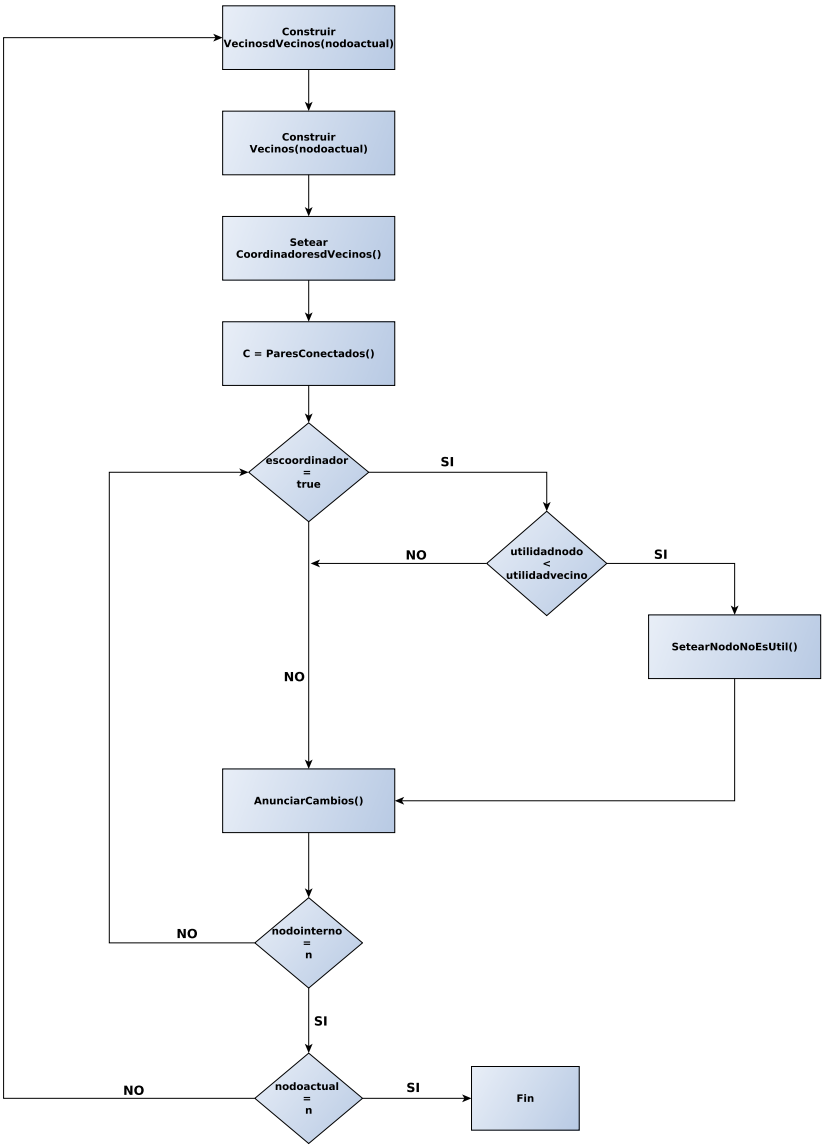


Figura 4.16: Proceso de compración de utilidades.

Sin embargo, el contar con entidades de abstracción superiores como las que son posibles construir con el enfoque SDN habilita la capacidad de establecer patrones de gestión global independientemente de las tecnologías de los dispositivos subyacentes.

También, SDN permite extender las entidades de entendimiento construidas a nuevas abstracciones de conocimiento, similar al pensamiento abstracto humano aunque sin conciencia. De aquí que SDN facilita la aplicación de algoritmos de inteligencia artificial en sus programas de funcionamiento.

Además, el registro de la asignación y comparación de utilidades usando el enfoque SDN permite que se configuren patrones detallados de los mejores casos de uso con respecto al consumo energético. Los patrones de comportamientos se analizan a nivel de grafos, abstracciones conceptuales como el comportamiento de la energía de vencindarios y relaciones entre las entidades que conforman la red. El plano central es capaz de relacionar el comportamiento histórico de dichos patrones con requerimientos actuales y proyectados de la red.

Consecuentemente, el enfoque SDN permite reducir el gasto energético mediante una gestión a nivel lógico de entidades sin la necesidad de afectar el nivel físico como cuando se utilizan algoritmos de programación de nodos dormidos. Por lo tanto, SDN habilita la capacidad de administrar todo este nuevo conocimiento de la red sin impactar en la disponibilidad de sus servicios.

Adicionalmente, el plano de control es capaz de construir un conocimiento sobre qué técnicas son las mas efectivas ante los usos de una red en particular. Este conocimiento extiende su visión incluso a nivel de capas de red o posibles combinaciones de mecanismos en diferentes capas de red. También, el plano de control es capaz de cambiar las definiciones de operación en tiempo de ejecución. Así, el ahorro energético se ve beneficiado porque la red adapta su comportamiento al uso más efectivo de acuerdo a la demanda de servicios en cualquier tiempo específico.

4.4.4 Selección de Rutas Hacia las Pasarelas Controladoras

Implementamos un procedimiento que puede detectar la mejor ruta hacia un nodo controlador o una pasarela controladora dentro de la red. El procedimiento se describe a continuación:

Primero, evaluamos las posibles rutas de acceso que existen hacia un controlador o pasarela controladora usando el protocolo de encaminamiento seleccionado. Así, obtenemos un grupo de rutas (CP_i) descritas por:

$$CP_i = g(n) + p(n), \qquad i \in [0, nc] \tag{4.15}$$

donde n denota el nodo evaluado actual y nc denota el número de controladores (controladores o pasarelas controladoras) dentro de la red. En cada caso, la ruta formada es $p(n)$, mientras $g(n)$ representa la posibilidad de usar la ruta. Los valores de $g(n)$ solamente pueden ser verdadero o falso.

Luego, revisamos todas las rutas disponibles y el costo relacionado a su uso. El costo general que un nodo gasta para alcanzar un controlador se define como sigue:

$$CPL_i = p_i(n) + c_i, \qquad i \in [0, nc] \tag{4.16}$$

donde $p_i(n)$ es la ruta formada disponible y c_i es el costo asociado de usar la ruta en términos de consumo de energía. El nodo evaluado actual es n y el número de controladores dentro de la red es nc.

Finalmente, comparamos todas las rutas disponibles y sus costos relacionados para definir la *la ruta con menor costo*. Esta estructura está descrita por:

$$lp = CPL_i + i, \qquad i \in [0, nc] \tag{4.17}$$

donde CPL_i fue definida en la ecuación 4.16 y nc denota el número de controladores dentro de la red.

En adición, aplicamos un enfoque basado en la arquitectura SDN al comportamiento de cada nodo, el cuál sigue las siguientes definiciones:

1. Todas las decisiones de encaminamiento son hechas por el panel de control central.

2. No existen decisiones locales entre nodos para la comunicación entre ellos. Los nodos solamente siguen las decisiones de encaminamiento de sus estructuras internas y esperan lo mensajes de *ControlCheck* para actualizar las intrucciones.

3. El controlador transmite mensjaes en una base de tiempo aleatoria. Por lo tanto, los intervalos de tiempo cambian en cada despliegue de red.

4. La movilidad global de cada nodo trabaja de forma aleatoria; por consiguiente, el patrón de viaje de cada nodo cambia en cada despliegue de red.

Finalmente, la columna vertebral de coordinadores es mantenida y actualizada (proceso CheckNet) mediante el uso de mensajes ControlCheck. Por lo tanto, la configuración de la frecuencia de los mensajes ControlCheck determina la variación en la tasa de tiempo con la que el controlador recolecta información.

4.5 Encaminamiento

Los algoritmos de encaminamiento guardan una relación profunda con la topología de una red. Existen enfoques que primero crean una topología y luego corren un algoritmo de encaminamiento sobre ella; otros enfoques crean la topología por demanda mientras se ejecuta el algoritmo de encaminamiento [139]. El enfoque SDN extiende el control sobre la topología y el encaminamiento desde que dentro de esta visión ambas entidades pueden gestionarse y estudiarse por separado o de forma híbrida [140]. Como resultado, todos los mecanismos de encaminamiento y gestión de topologías se vuelven personalizables por demanda.

Las topologías de red generalmente se representan como grafos. La figura 4.17 muestra un grafo y sus bordes con el objetivo de representar una topología de red en un determinado tiempo. Con este conocimiento aislado en el plano de control central de la red se puede obtener información interesante como: nodos más aislados de los vecindarios, nodos con más conexiones, desconexiones que causan fracturación de la red, caminos de llegada a un nodo. Luego, esta información es valiosa para proyectar el consumo energético de un algoritmo de encaminamiento específico.

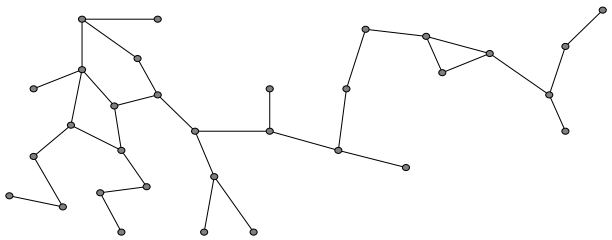


Figura 4.17: Conexiones entre nodos de una red.

Actualmente, existen diferentes tipos de algoritmos de encaminamiento orientados a prestaciones específicas. Por ejemplo, algoritmos de encaminamiento que consideran el gasto energético; otros podrían considerar los servicios de las capas superiores de red; otros algoritmos podrían considerar la movilidad excesiva de los nodos, etc. Generalmente, una tecnología de red es compatible solamente con un limitado conjunto de algoritmos de encaminamiento y los ejecuta de forma aislada.

También, es muy común que las tecnologías de red puedan reprogramarse en su encaminamiento; pero, con un proceso poco eficiente y que afecta los servicios de la red. Nuestra propuesta posee la ventaja que los cambios entre diferentes algoritmos de encaminamiento pueden desplegarse en tiempo de ejecución, incluso de acuerdo a patrones de configuración de la red que nos interesen en determinados intervalos de tiempo [141].

4.5.1 Capacidades de Encaminamiento

Cross-over-net habilita un encaminamiento capaz de seleccionar su tipo de acuerdo a las necesidades de consumo energético. Esta selección puede construirse tanto con los grafos de topología de la red como con los algoritmos de encaminamiento. Además, esta capacidad puede configurarse de acuerdo al tipo de tecnología y estándares de los dispositivos; como resultado, se beneficia la administración de los recursos de una red heterogénea, las cuáles son muy comunes en los entornos IoT [142]. Consecuentemente, el plano de control central tiene la posibilidad de ser autogestionable desde una perspectiva del consumo energético, tal como lo quieren construir las redes de acceso de radio.

El pseudocódigo para la llamada de tipo de encaminamiento en un grafo de la red se muestra en la Figura 4.18. En una primera instancia, el plano de control calcula las estructuras que definen el vecindario para contar con la información base. Luego, ejecutan el proceso de asignación y comparación de utilidades descrito en la sección 4.4.3. Posteriormente, Si el nodo debe acceder al plano de control central se ejecutan los procesos de verificación del acceso y de las rutas para alcanzar dicho acceso; así, si el nodo alcanza alguna pasarela controladora se procede a asignar el mejor algoritmo de encaminamiento, a la mejor ruta. Dicha asignación considera los objetivos de ahorro energético que queremos alcanzar en el comportamiento de la red. En el caso de que el nodo no tenga una ruta hacia alguna pasarela controladora, el plano de control procede a ejecutar los algoritmos definidos para cuando un nodo este fuera del grafo de la red. Finalmente, el algoritmo limpia las estructuras utilizadas para que queden listas para la siguiente iteración.

El método de llamada del tipo de encaminamiento encaja en las partes del proceso general de *Cross-over-net* donde los nodos requieren comunicarse con el plano

```
1  Por cada nodo cn{
2    Calcular estructuras que definen el vecindario;
3    Verificar la utilidad de los nodos;
4    Si nodo debe acceder al plano de control {
5      Verificar las rutas a pasarelas controladoras;
6      Si nodo alcanza alguna pasarela controladora{
7        Asignar un algoritmo de encaminamiento a la
             mejor ruta;
8      }
9      en caso contrario{
10       Ejecutar los algoritmos de nodo fuera del
             grafo de red;
11     }
12   }
13   LimpiarEstructuras(cn);
14 }
```

Figura 4.18: Pseudocódigo de llamada a tipo de encaminamiento.

```
1          caso = nodoactual;
2          Por cada pasarela controladora pc{
3            rutapc[npc] = Encaminamiento[tipo](caso);
4          }
5          //Aplicar cada tipo de encaminamiento de acuerdo al
             caso
6          switch(rutacaso)
7          {
8          case npc:
9        AplicarHop(Ruta.hopusado);
10         default:
11           break;
12         }
```

Figura 4.19: Pseudocódigo de evaluación de rutas.

de control central y viceversa. Generalmente, la llamada del tipo de encaminamiento es común en los procesos de asignación y retiro de las funciones de coordinación para los nodos de la red.

También, el método de llamada del tipo de encaminamiento tiene aspectos dinámicos que es posible cambiar en tiempos de ejecución, tales como: los grafos de las estructuras que definen los vecindarios, las rutas a las pasarelas controladoras, el algoritmo de encaminamiento sobre los grafos topológicos y las acciones a ejecutar en caso de detectar un nodo fuera del grafo de red.

Por otro lado, la figura 4.19 presenta el pseudoalgoritmo de evaluación de rutas. En primer lugar, el plano de control define el nodo al cuál aplicarle el tipo de encaminamiento y las pasarelas controladoras existentes en la red. Después, por cada pasarela controladora establece una ruta de acuerdo al tipo de encaminamiento y al nodo actual. Posteriormente, el plano de control define que pasarela usará; al mismo tiempo, aplica el tipo de encaminamiento de acuerdo a la ruta seleccionada y los saltos utilizados. Finalmente, el plano de control central acciona la ruta y los saltos correspondientes.

La evaluación de rutas se acopla al resto del algoritmo general de *Cross-over-net* cuando el plano de control central analiza los potenciales gastos de energía para

la comunicación con los nodos del grafo topológico de red. También, la evaluación de rutas se despliega en los procesos de creación y mantemiento de subgrafos como el subgrafo de nodos coordinadores.

Además, el proceso de evaluación de rutas es capaz de asignar dinámicamente el tipo de encaminamiento en cada ruta a una pasarela controladora, los saltos usados en la ruta seleccionada, el número de las pasarelas controladoras y la posición de las pasarelas controladoras.

4.5.2 Errores en el Grafo de Red

La detección de errores en tiempos de ejecución es importante para mejorar los ahorros en el gasto energético. En nuestro enfoque es posible detectar errores en el análisis del entorno virtual del plano de control central antes de pasar cambios a producción. También, es posible detectar errores durante el análisis de las rutas de un grafo de topología en un momento determinado, porque el plano de control cuenta con toda la información para detectar si es posible alcanzar un nodo o este se encuentra fuera del grafo de red en determinado momento.

Potenciales errores pueden ocurrir cuando un nodo no es alcanzado por las rutas a las pasarelas controladoras existentes; así, cada algoritmo de encaminamiento presenta sus propios criterios de error cuando no es posible ir de un nodo a otro. Finalmente, el enfoque considera errores después de superar umbrales de tiempo sin respuesta en las comunicaciones.

Así, la detección de errores puede orientarse a mejorar el ahorro energético; ya que, al momento de detectar un fallo potencial en el encaminamiento, el algoritmo se ahorra el envío de paquetes, porque sabe de antemano que las rutas no garantizan un encaminamiento al destino seleccionado. Además, el algoritmo tiene la capacidad de cambiar el esquema de encaminamiento por uno más eficiente energéticamente cuando se detectan fallos potenciales.

El pseudocódigo para la llamada del tipo de encaminamiento en un grafo de la red se muestra en la Figura 4.20. En una primera instancia, el plano de control analiza si el nodo actual alcanza alguna pasarela controladora para ejecutar las tareas de encaminamiento; de lo contrario, se ejecutan los algoritmos de tratamiento de

errores correspondientes al caso de un nodo fuera del rango de la red. Posteriormente, se ejecuta la primera tarea de encaminamiento asignando un algoritmo de encaminamiento a la mejor ruta, tal como lo describe la sección 4.5.1. Después, se ejecutan las iteraciones correspondientes al algoritmo de encaminamiento asignado. Una vez ejecutadas las iteraciones de encaminamiento asignado se está en la capacidad de analizar los costos energéticos de las posibles rutas que se forman. Así, el plano de control asigna las rutas que pueden ser utilizadas al mejor costo energético minimizando el envío y recepción de paquetes de comunicación. Luego, la entidad controladora (plano de control central) verifica si las iteraciones del algoritmo de encaminamiento y las rutas asignadas no presentan errores o potenciales errores. En caso de presentar potenciales errores procede a ejecutar los algoritmos correspondientes para tratar los tipos de errores. Finalmente, el algoritmo limpia las estructuras utilizadas para que queden listas para la siguiente iteración.

También, el proceso de prueba de las conexiones tiene aspectos dinámicos que es posible cambiar en tiempos de ejecución, tales como: los procesos de cálculos de costos del encaminamiento, la selección del mejor costo energético, los algoritmos que se siguen cuando un nodo no está al alcance del grafo de red y los algoritmos de tratamiento de errores.

El método de llamada del tipo de encaminamiento encaja en las partes del proceso general de *Cross-over-net* donde los nodos requieren comunicarse con el plano de control central y viceversa. Generalmente, la llamada de tipo de encaminamiento es común en los procesos de asignación y retiro de las funciones de coordinación para los nodos de la red.

Consecuentemente, nuestro enfoque basado en SDN habilita dentro del método de llamada del tipo de encaminamiento la flexibilidad de aplicar, en tiempo de ejecución, diferentes esquemas de prioridades. Por ejemplo, el tipo de encaminamiento puede estar configurado, en determinado momento, con un enfoque orientado a tablas porque es lo más efectivo de acuerdo al uso que se le está dando a la red; no obstante, los patrones de uso cambian y la prioridad ahora es mantener la máxima energía de los nodos posibles. Así, el algoritmo ejecuta una llamada de tipo de encaminamiento para cambiar a un encaminamiento orientado al consumo energético. Las operaciones se realizan dinámicamente desde el plano de control

```
Por cada nodo cn{
  Si nodo alcanza alguna pasarela controladora{
    Asignar un algoritmo de encaminamiento a la
       mejor ruta;
    Ejecutar iteraciones generales del algoritmo de
       encaminamiento;
    Calcular costos del encaminamiento;
    Seleccion del mejor costo energetico;
    Asignacion de rutas usadas a mejor costo;
    Si errores han sido detectados{
            Ejecutar tratamiento de errores;
        }
  }
  en caso contrario{
    Ejecutar los algoritmos de nodo fuera del grafo
       de red;
    Ejecutar tratamiento de errores;
  }
}
LimpiarEstructuras(cn);
```

Figura 4.20: Pseudocódigo de prueba de conexiones en el grafo de red.

central sin afectar los servicios de la red de producción. Otros esquemas de encaminamiento son las rutas por demanda, las rutas orientadas a la movilidad de los nodos o el encaminamiento de nodos estáticos.

4.6 Evaluación

El enfoque de *Cross-over-net* se centra en explotar las capacidades extendidas que ofrece el enfoque SDN para aplicar técnicas que ahorren energía en las redes inalámbricas Adhoc. Así, *Cross-over-net* usa propiedades de SDN para orquestar dispositivos con uso eficiente de energía basado en técnicas de control de topologías, que fuera del entorno SDN solamente pueden aplicarse a redes de sensores inalámbricas. Sin embargo, algunas preguntas surgen al proponer esta integración de paradigmas: (1) ¿Cómo se desenvuelve el algoritmo en entornos de nodos estáticos y en entornos de nodos móviles?,(2) ¿Cada cuánto se vuelve la información del plano de control obsoleta para los objetivos buscados en el ahorro energético?, (3)¿Cuál es el comportamiento de los vecindarios para las necesidades de comunicación? y (4)¿Cuáles son las extensiones que más impactan de acuerdo a nuestros objetivos energéticos?.

Para responder a estás preguntas, hemos analizado la solución propuesta desde diferentes puntos de vista: analizaremos el consumo energético y el tiempo de vida de la red en un entorno estático (Sección 5), estudiaremos el comportamiento de los modelos móviles y las implicaciones relacionadas con el consumo energético (Sección 6). En ambos casos analizaremos el comportamiento de las intereacciones en los vecindarios; así como la utilización de la información relevante de la red.

4.6.1 Propiedades del Algoritmo

La sección 2.3, introduce las nociones de las iniciativas en redes definidas por software. Consecuentemente, nuestra propuesta considera en su evaluación las propiedades relevantes del entorno SDN. Dichas propiedades relevantes tomadas a consideración en este trabajo de investigación son:

- **Escalabilidad.** Esta propiedad se refiere a la eficiencia de la arquitectura para agregar entidades de red a medida que los requerimientos se vuelven más demandantes.

- **Separación de preocupaciones.** Es la habilidad del algoritmo de encapsular en entidades claramente separadas las tareas relacionadas a un sólo grupo de información o políticas de administración.

- **Dinamismo.** Se refiere a la variedad de acciones posibles de implementar dentro del paradigma en tiempos de ejecución. Hemos considerado el dinamismo del modelo dentro de las áreas de políticas de conformación de topologías de red, modos de encaminamiento, administración de plano de control independiente de las tecnologías subyacentes y orquestación de dispositivos independiente del dominio IoT.

- **Portabilidad.** Es la habilidad del modelo para operar en diversas plataformas sin necesidad de cambios o actualizaciones en su núcleo. Además, la portabilidad considera el despliegue agnóstico con interfaces de otros ambientes auxiliares o complementarios.

- **Programabilidad.** Es la habilidad del modelo para soportar despliegues basados en los conceptos, abstracciones y modelos de los lenguajes de programación más robustos.

- **Simplicidad.** Se refiere a que el modelo minimiza la complejidad de los despliegues de diferentes tipos de redes y al mismo tiempo maximiza las capacidades de los procesos para el ahorro energético.

4.6.2 Extensiones del Plano de Control

Nuestro enfoque construye una nueva entidad desde la abstracción del plano de control separado de la red alcanzada por SDN. Así, en el despliegue de está novedosa entidad se han evaluado los siguientes aspectos fundamentales:

- **Representaciones del conocimiento.** Es la capacidad del plano de control de estructurar la información que fluye en sus entidades para construir representaciones de conocimiento que luego ayuden a tomar decisiones más inteligentes.

- **Librerías de servicios.** La capacidad del plano de control de crear grupos de definiciones de rutinas que administren recursos de red o proporcionen soluciones a los requerimientos que surgen en la operación de diversos tipos de redes [143].

- **Autogestión.** La habilidad del plano de control para configurar automáticamente las librerías de servicios. Esto permite que el plano de control se acople a interfaces automáticas que respondan a las necesidades que la red demanda. Por ejemplo en redes celulares con arquitectura de acceso verde(eficiente con el medio ambiente) [144].

- **Manejo de errores.** La flexibilidad de abordar los errores desde diferentes enfoques que pueden incluso cambiar en tiempos de ejecución. Como resultado, el manejo de errores puede cambiar de acuerdo a la prioridad que se establezca para un determinado tiempo; por ejemplo, tratar el error priorizando el consumo energético.

- **Orquestamiento de diferentes capas.** Se refiere a la habilidad de gestionar por demanda los procesos a diferentes niveles de las capas definidas por los estandares. Esta habilidad también incluye la gestión para integrar capas de diferentes modelos en una sóla abstracción de control.

4.7 Resumen

Este capítulo presenta la arquitectura del algoritmo *Cross-over-net*. En particular, esta arquitectura separa las abstracciones de datos y de control de la red subyacente. Consecuentemente, la abstracción de control es gobernada por un ente controlador que puede concebirse de forma centralizada pero que en sus diversos niveles de abstracción puede ser distribuido.

Las principales características de nuestra propuesta es la habilidad de concebir el funcionamiento de una red Adhoc inalámbrica separada en sus abstracciones de manejo de datos, manejo de control y orquestación de tecnologías físicas. Así, el capítulo describe el diseño de nuestra propuesta, también sugiere una posible arquitectura de despliegue y las directrices de operación que rigen el comportamiento del algoritmo. Finalmente, el capítulo expone las posibilidades extendidas en las nociones de encaminamiento que es una de las partes críticas de la inteligencia de control de una red.

A pesar de que nuestro objetivo es el ahorro energético, este enfoque abre nuevas posibilidades para el algoritmo de funcionamiento; tales como, nuevas formas de alta disponibilidad en entidades de la red, tolerancia a fallos en los diferentes niveles de abstracciones que permite SDN y aplicación de técnicas para tratar nuevas representaciones del conocimiento independientemente del paradigma de red subyacente.

Finalmente, es importante apuntar que la mayor debilidad del algoritmo propuesto es el alto impacto de un fallo en la centralización del plano de control de la red; no obstante, el riesgo de este aspecto se minimiza cuando *distribuimos lo centralizado*, como por ejemplo al desplegar varios controladores centrales en diferentes posiciones dentro de la red.

Simplicity and elegance are unpopular because they require hard work and discipline to achieve and education to be appreciated.

Edsger Dijkstra

CAPÍTULO

5

Consumo de Energía en WANETs Estáticas Definidas por Software

La principal característica de las redes que dan forma a los dominios IoT es su heterogeneidad. Una WANET heterogenea puede presentar además de diversas tecnologías, diversas propiedades de posición, por ejemplo, ser móviles, estáticas o incluso un híbrido de ambas. En este apartado nos centraremos en analizar las WANETs estáticas en términos de consumo energético.

Las WANETs estáticas (como todos los tipos de WANETs) presentan diversos tipos de niveles abstracción en su definición. Una de las ventajs de nuestro enfoque es que puede aplicarse a cualquier tipo de nivel de abstracción de una WANET estática. Así, nuestra propuesta habilita la propiedad de unir en un solo ente el control de diferentes tipos de WANETs estáticas. Esto permite aplicaciones en WMNs, WSNs, RANs y WANETs heterogeneas que presenten el comportamiento estático de sus nodos.

Algunas aplicaciones de estos entornos estáticos son: WMNs en edificios inteligentes, WSNs en ambientes de agricultura, WSNs en casas inteligentes, redes de

dispositivos estáticos como lámparas, puertas, electrodomésticos o cámaras, redes de switches inalámbricos de alta disponibilidad.

5.1 Comportamiento Susceptible al Uso de Energía

Este trabajo de investigación se centra en el consumo eficiente de energía. En WANETs el caso que más reproduce un comportamiento estático es el caso de las WMN. Por lo tanto, este tipo de redes se vuelve un caso de uso ideal para aplicar la eficiencia energética desde un plano de control central.

5.1.1 SDN en WMN

WMN permite implementar diferentes arquitecturas que facilitan una serie de funciones y características de red. La decisión de optimizar más una característica que otra dependerá de las necesidades que cubrirá la red. En la literatura existen trabajos que integran SDN a estas redes con el objetivo de obtener las siguientes funcionalidades:

- Flujo basado en el encaminamiento.
- Encaminamiento que puede distribuirse por múltiples rutas.
- Modulación de tráfico integrada.
- Posibilidad de usar concurrentemente diferentes protocolos de encaminamiento.
- Interfaces de servicios web en los controladores.
- Virtualización.

Las funcionalidades mencionadas anteriormente convierten a la red capaz de distribuir el tráfico, ya sea sobre la red completa o sobre un nodo. Así mismo, la red puede reducir la duración de cortes durante el traspaso de tareas de los nodos, y también, estas funcionalidades permiten reforzar las configuraciones QoS, la migración de rutas entre redes, y la estandarización de herramientas de optimización. Por último, las funcionalidades relacionadas a internet facilitan la integración con servicios web y refuerzan la integración con tecnologías de la nube.

5.1.2 WMN integradas a IoT

Las WMN están logrando una presencia muy profunda en la construcción de entornos ubicuos IoT. Así, tenemos redes de malla para hogares donde es posible conectar a los ruteadores malla los diversos objetos del hogar, por ejemplo, televisores, teléfonos, ordenadores, impresoras, cámaras, lavadoras, tablets, PDAs, etc. Esta conexión crea una red personalizada de una casa.

También existen redes de malla para conectar una comunidad o vecindario donde diversas casas (ya sea con sus redes internas o no) se conectan entre si para compartir recursos y servicios.

Un despliegue similar usa las WMN para entornos empresariales, la única diferencia en la implementación es que en lugar de conectar casas se conectan oficinas. Otra aplicación interesante es usar las WMN para conectar vehículos, casas, oficinas, hospitales, supermecados, apartamentos y dispositivos móviles todos dentro una red metropolitana especializada.

También, en sistemas de transporte se puede utilizar la tecnología WMN para proporcionar servicios personalizados a usuarios del transporte, extender las prestaciones remotas de un medio de transporte, y habilitar nuevos servicios en comunicación de información y seguridad.

5.2 Consumo Energético en Escenarios de Nodos Estáticos

Para analizar el consumo energético de los posibles despliegues de escenarios IoT de WANETs estáticas descritos en la sección anterior 5.1 y al mismo tiempo brindar un marco de referencia para la comparación de enfoques distribuidos y centralizados se han efectuado experimentos de escenarios de redes simulados.

Los análisis de rendimiento energético de *Cross-over-net* han sido implementados en el simulador de redes OMNeT++. Se ha comparado el gasto energético de *Cross-over-net* contra el algoritmo distribuido de control de topologías Span.

5.2.1 Definiciones Iniciales

Desde un punto de vista probabilístico la frecuencia de 30 (con una varianza de 20) ofrece un grado de confiabilidad aceptable; por lo tanto, se han simulado redes de 10, 20, 30, y 50 nodos inalámbricos en una región rectangular. Los nodos en nuestra simulación tienen un ancho de banda de 2Mbps y un rango de transmisión de 150 metros que son los valores más generales entre los tipos de tecnologías de redes inalámbricas. Además, los nodos envían paquetes de 128 bytes a nodos destino seleccionados de acuerdo al algoritmo. Por simplicidad, se han considerado los servicios de descubrimiento en un módulo de control separado de cada nodo. Las consideraciones iniciales de *Cross-over-net* en los escenarios simulados son:
Definición I: En una primera instancia, cada nodo anuncia y registra su posición en el módulo de descubrimiento e inicializa sus estados a cero.

Definición II: El módulo de descubrimiento calcula la distancia euclidiana de cada par de nodos y los registra en una matriz de valores.

Definición III: El controlador de red inicializa sus estadísticas y estados construyendo los grafos de vecinos de cada nodo usando la información de la capa MAC. Luego procede a construir el estado global de la red virtual y la red de producción.

Definición IV: Cada nodo construye sus tablas de vecinos locales y las compara con las del controlador. Periódicamente, el controlador (plano de control) revisará la red, con el objetivo de construir un nuevo grafo de red y un nuevo CDS usando el algoritmo descrito en la sección 4.2.

5.2.2 Consumo Energético

Los potenciales ahorros energéticos dependen de la densidad de los nodos y la posición del controlador. Las gráficas de las Figuras 5.1, 5.2, 5.3, y 5.4 describen la evolución del factor de energía en las redes simuladas usando los valores ideales iniciales descritos anteriormente. Bajo estos supuestos, *Cross-over-net* ahorra 21 %, 27 %, 22 % y 11 % de energía en escenarios con 10, 20, 30 y 50 nodos respectivamente comparado con Span. Es evidente que la forma coordinada de controlar la red con *Cross-over-net*, reduce el uso de mensajes requeridos en los nodos individuales para anunciar la elección o retirada de tareas de coordinación. Además, para mantener las tablas de vecinos individuales, menos mensajes de red son necesarios con el algoritmo coordinado propuesto. Finalmente, es posible concluir que en el uso total de energía, el impacto de los costes de la inicialización en *Cross-over-net* se incrementa a medida que se incrementa el número de nodos, reduciendo la diferencia en el uso de energía. Sin embargo, *Cross-over-net* provee ahorros de energía incluso en el escenario de 50 nodos.

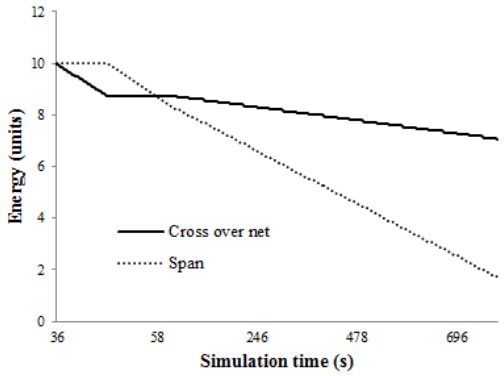


Figura 5.1: Comportamiento del factor de energía (área 400m x 400m). Hay 10 nodos distribuidos aleatoriamente durante una simulación de 800s.

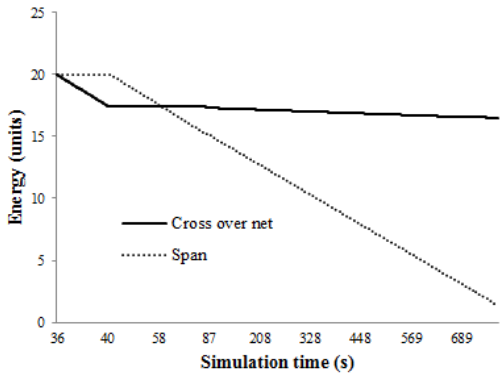


Figura 5.2: Comportamiento del factor de energía (área 500m x 500m). Hay 20 nodos distribuidos aleatoriamente durante una simulación de 800s.

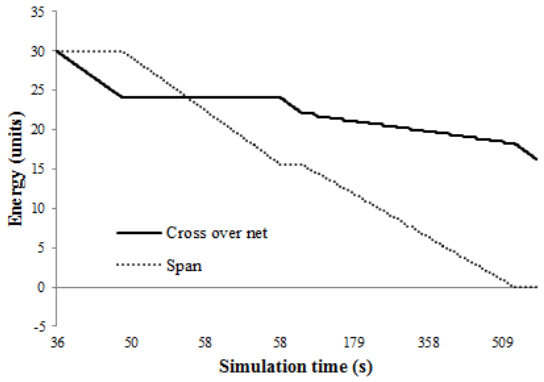


Figura 5.3: Comportamiento del factor de energía (área 500m x 500m). Hay 30 nodos distribuidos aleatoriamente durante una simulación de 800s.

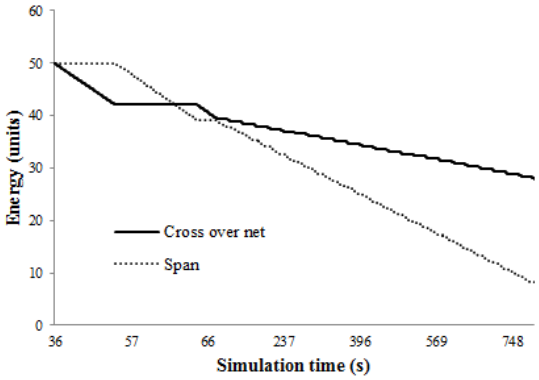


Figura 5.4: Comportamiento del factor de energía (área 1000m x 1000m). Hay 50 nodos distribuidos aleatoriamente durante una simulación de 800s.

5.2.3 Tiempo de Vida de la Red

Se ha definido el tiempo de vida de la red como el tiempo que transcurre para que un nodo de la red se quede sin energía para comunicarse. Las Figuras 5.5, 5.6, 5.7, y 5.8 presentan los resultados de los experimentos, considerando que cada nodo inicia con una energía de 15 Watts. Cuando el número de nodos son 10 y 20, el tiempo de vida de la red es más estable en *Cross-over-net*. El primer nodo se desactiva en Span a los 668 segundos y 568 segundos respectivamente, en tiempo de simulación, mientras que *Cross-over-net* presenta la muerte del primer nodo a los 786 segundos y 726 segundos respectivamente. Esto representa un 20 % de extensión del tiempo de vida de la red. En los escenarios de 30 y 50 nodos, obtuvimos un mejor tiempo de vida de red con Span, esto es debido a que en nuestro algoritmo el uso de nodos está relacionado con el tamaño de la red y así el primer nodo muere en *Cross-over-net* a los 126 segundos y 96 segundos respectivamente, mientras que Span presenta la muerte del primer nodo a los 208 segundos y 568 segundos respectivamente.

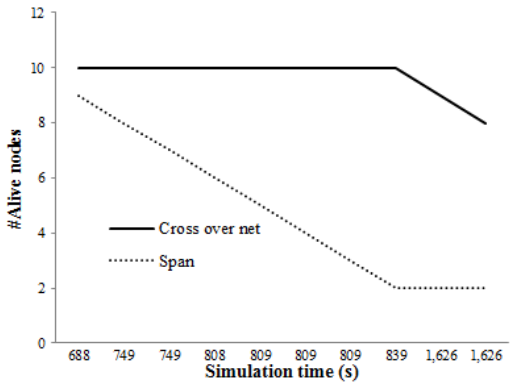


Figura 5.5: Comportamiento del tiempo de vida de la red (área 400m x 400m). Hay 10 nodos distribuidos aleatoriamente durante una simulación de 800s.

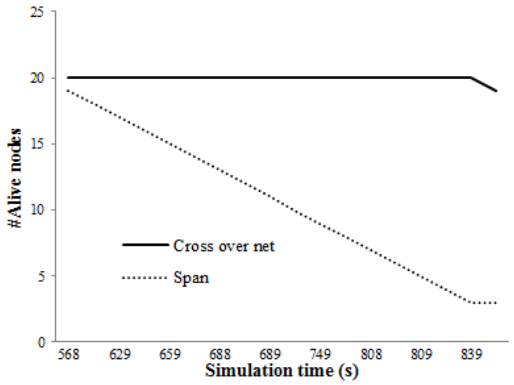


Figura 5.6: Comportamiento del tiempo de vida de la red (área 500m x 500m). Hay 20 nodos distribuidos aleatoriamente durante una simulación de 800s.

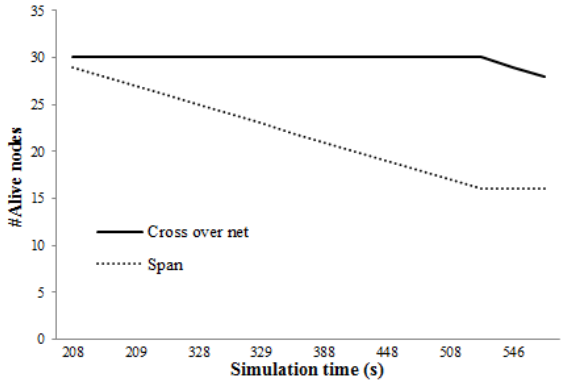


Figura 5.7: Comportamiento del tiempo de vida de la red (área 500m x 500m). Hay 30 nodos distribuidos aleatoriamente durante una simulación de 800s.

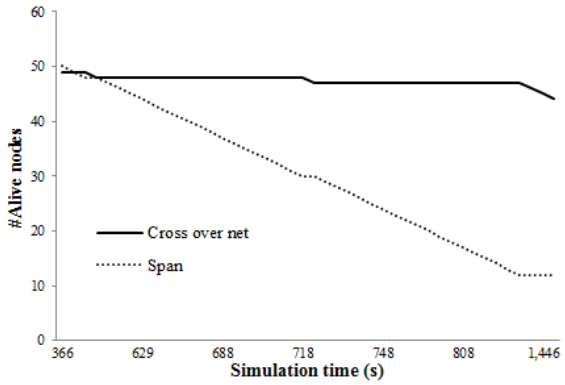


Figura 5.8: Comportamiento del tiempo de vida de la red (área 1000m x 1000m). Hay 50 nodos distribuidos aleatoriamente durante una simulación de 800s.

5.3 Discusión de Resultados

Nuestro enfoque extiende la gestión de WANETs estáticas, en el sentido de que habilita la posibilidad de hacer compatibles técnicas exclusivas de otros tipos de redes con el modelo de operación de las WANETs estáticas. Concretamente, nuestro enfoque utiliza técnicas exclusivas de WSNs [145] para ahorrar energía dentro del modelo de WANETs estáticas. Además, es posible utilizar técnicas híbridas de diferentes tipos de red, para el plano de control, la gestión de la red es bajo las mismas reglas.

Las aplicaciones de entornos de redes estáticos está extendida dentro de los dominios IoT. Por ejemplo, WANETs estáticas se despliegan dentro de edificios inteligentes para rastrear sensores (móviles o estáticos) dentro de sus pasillos; también, WANETs estáticas se usan en dominios IoT de agricultura y granja para monitorear y/o registrar las condiciones de los cultivos. Otros escenarios idóneos para despliegues de WANETs estáticas son: sensorización de lugares en ciudades inteligentes, interconexión de redes de servicio para vecindarios conectados, redes de vigilancia remota y sensorización de campos de guerra para rastrear datos. Así, en todos estos dominios IoT se aplica la naturaleza estática de las redes. Esta naturaleza estática implica dentro de nuestro algoritmo un ciclo de mensajes más corto; ya que, como el grafo de red cambia con poca frecuencia (incluso en algunos escenarios es probable que no cambie) no es necesario un intercambio de mensajes de control entre vecindarios con frecuencia alta; también, por la misma naturaleza estática del ambiente la información que construye el conocimiento del plano de control central tiende a ser obsoleta en rangos muy altos de tiempo.

Esta disertación propone volver a los orígenes de perspectivas centralizadas en redes para recobrar su simplicidad. No obstante, enfatizamos que esta centralización es a nivel de la abstracción de control; ya que, nuestra propuesta aún puede ser distribuida por ejemplo a nivel de la capa física. La razón fundamental de esta idea es que la simplicidad del control centralizado escribe y lee conocimiento de comunicación usando el mínimo de mensajes de control entre nodos.

En el apartado anterior hemos abordado la evaluación del consumo energético en las WANETs estáticas utilizando nuestro algoritmo orientado al modelo de

redes definidas por software dentro de un ambiente de simulación de redes. En primera instancia se describe la relación de las WANETs estáticas con las posibles arquitecturas de despliegue que encajan en los dominios IoT. Luego, analizamos el consumo energético en diferentes escenarios de densidad de nodos. Observamos que nuestro algoritmo logra mejoras significativas para el consumo energético en entornos con menos de 50 nodos de red. También, notamos que por la naturaleza estática de estos escenarios las rutas de encaminamiento tienden a no cambiar con frecuencia, por lo que la energía sobrante de los nodos individuales es la variable de mayor impacto dentro de los vecindarios. Finalmente, el capítulo aborda una discusión de las posibles extensiones, retos y aplicaciones de nuestro enfoque dentro de estos entornos conformados por WANETs estáticas.

La tabla 5.1 indica los algoritmos que presentaron mejor rendimiento en términos de factor energético, tiempo de vida de red y saltos de paquetes de comunicación en los diversos escenarios evaluados.

	10 nodos		**20 nodos**		**30 nodos**		**50 nodos**	
	Cross	**Span**	**Cross**	**Span**	**Cross**	**Span**	**Cross**	**Span**
Factor energía	✓		✓		✓			✓
Tiempo de vida	✓		✓		✓		✓	
Saltos mensajes	✓		✓		✓		✓	✓

Tabla 5.1: Mejores rendimientos de consumo energético

De acuerdo a los resultados se puede concluir que el tamaño de 30 nodos puede considerarse como un punto de inflexión entre una perspectiva distribuida y una perspectiva centralizada. Con un número de 50 nodos el tamaño de la red impacta de forma negativa en las consideraciones de una administración con una inteligencia central.

También, a mayor tamaño de la red mayor necesidad de conocimiento. Los resultados muestran que con un conocimiento de vecinos, distancias, algoritmos de encaminamiento y capas de red es posible administrar los planos de control y plano de datos de redes móviles estáticas menores o igual de 50 nodos. Además, la obsolescencia de la información clave como nodos coordinadores, vecinos, rangos

de cobertura, etc es similar en despliegues de 10, 20, 30 y 50 nodos; ya que, la naturaleza estática de estás redes permite operar con bajos cambios sobre variables de red.

Por otro lado, el controlador tiene la capacidad de crear *componentes de información* i.e. porciones de información que juntas crean un conocimiento superior a ellas mismas. Luego, utilizar dichos componentes para desarrollar un registro de estados de la red. Los escenarios mayores de 50 nodos pueden separarse en diferentes componentes siguiendo las reglas del despliegue simulado en este apartado.

Finalmente, la tendencia general del comportamiento de eficiencia en el tiempo de vida de la red móvil estática, según los resultados de este apartado es la siguiente: la eficiencia en el tiempo de vida de la red va mejorando en los escenarios de 10,20,30 nodos para luego empezar a decaer en un escenario de 50; no obstante, mejoras en el despliegue son posibles para obtener una excelente eficiente en escenarios mayores de 50 nodos e.g. incrementar a más de uno el número de dispositivos controladores de red.

¡El infinito! Ninguna cuestión ha conmovido tan profundamente el espíritu del ser humano.

David Hilbert

CAPÍTULO

6

Consumo de Energía en WANETs Móviles Definidas por Software

La movilidad genera grandes cambios en los paradigmas de red. Las WANETs no son la excepción. En la literatura existen diversos modelos de movilidad que imitan situaciones de la vida real. La selección del modelo de movilidad depende de las aplicaciones que soportará la red.

La movilidad afecta a cada vecindario de la red. Además, la actividad cambiante generada en cada vecindario afecta también a la cantidad de mensajes que se intercambian; así como los grafos subyacentes de control y monitoreo que determinan la obsolescencia de la información de red. Por consiguiente, todos estos cambios se traducen en gasto energético que debe gestionarse. Así, en la medida que descifremos la información clave para desplegar una gestión inteligente lograremos alcanzar nuestros objetivos de ahorro energético.

6.1 Antecedentes

Diferentes tipos de red presentarán diferentes patrones de movilidad. Así, El modelo general de movilidad de una red dependerá de la entidades virtuales que conformarán la red. También, se debe considerar que las redes móviles dentro de entornos IoT presentan aleatoriedad en la selección de ángulos, distancias y aceleraciones para sus nodos. A continuación describimos los principales enfoques relacionados con modelos de movilidad que pueden simular el movimiento de nodos dentro de una red.

Los modelos de movilidad en general se pueden separar en modelos de movilidad de entidad y modelos de movilidad de grupo [146].

6.1.1 Modelos de Movilidad de Entidad

Modelo de movilidad caminata aleatoria: Un modelo de movilidad simple basado en direcciones y velocidades aleatorias. La Figura 6.1 muestra un patrón de este modelo.

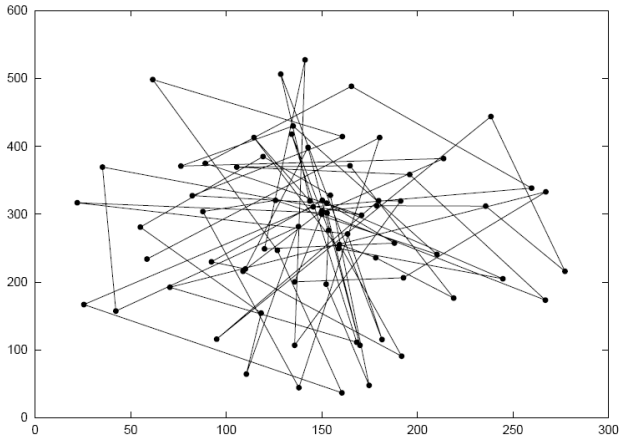


Figura 6.1: Patrón de movimiento de un nodo móvil usando el modelo de movilidad caminata aleatoria.

Modelo de movilidad punto de ruta aleatorio: Un modelo que incluye pausas de tiempo entre los cambios de destino y velocidad. La Figura 6.2 muestra un patrón de este modelo.

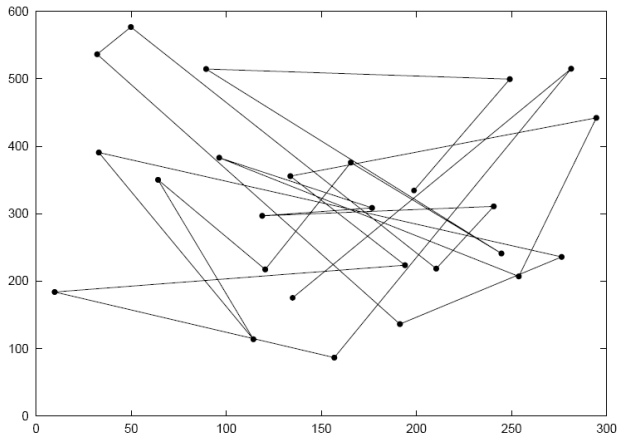


Figura 6.2: Patrón de movimiento de un nodo móvil usando el modelo de movilidad punto de ruta aleatorio.

Modelo de movilidad dirección aleatoria: Un modelo que fuerza a los nodos móviles a viajar al margen del área de simulación antes de cambiar de dirección y de velocidad. La Figura 6.3 muestra un patrón de este modelo.

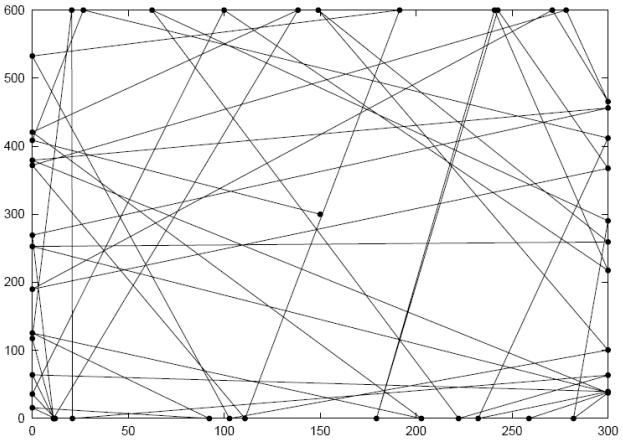


Figura 6.3: Patrón de movimiento de un nodo móvil usando el modelo de movilidad dirección aleatoria.

Modelo de movilidad área de simulación sin límites: Un modelo que convierte un área de simulación rectangular 2D en un área de simulación en forma de toroide. La Figura 6.4 muestra un patrón de este modelo.

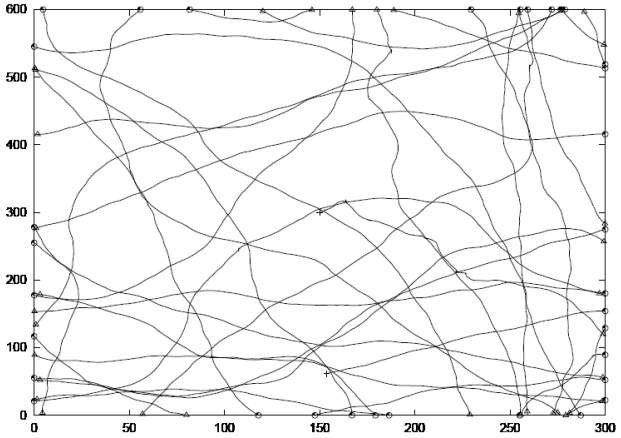


Figura 6.4: Patrón de movimiento de un nodo móvil usando el modelo de movilidad área de simulación sin límites.

Modelo de movilidad Gauss-Markov: Un modelo que utiliza un parámetro ajustable para variar el grado de aleatoriedad en un patrón de movilidad. La Figura 6.5 muestra un patrón de este modelo.

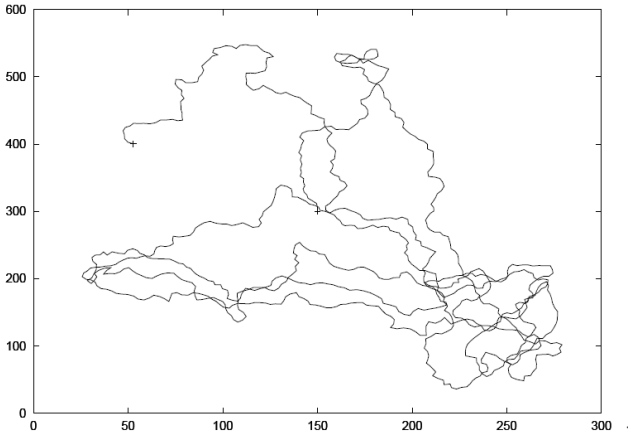


Figura 6.5: Patrón de movimiento de un nodo móvil usando el modelo de movilidad Gauss-Markov.

Modelo de movilidad versión probabilística del enfoque de caminata aleatoria: Un modelo que utiliza un grupo de probabilidades para determinar la siguiente posición de un nodo móvil. La Figura 6.6 muestra un patrón de este mode-

lo.

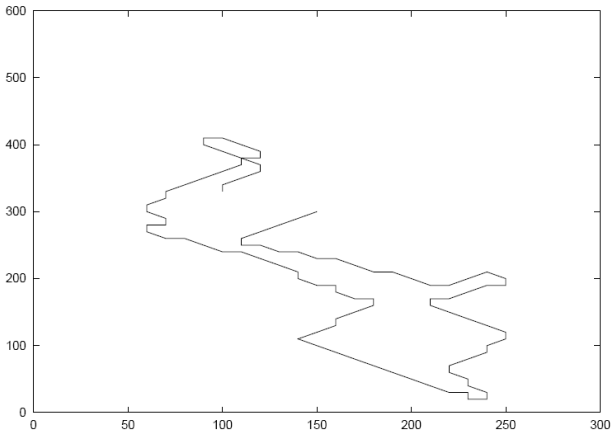


Figura 6.6: Patrón de movimiento de un nodo móvil usando el modelo de movilidad versión probabilística del enfoque de caminata aleatoria.

Modelo de movilidad sección de una ciudad: Un área de simulación que representa calles dentro de una ciudad. La Figura 6.7 muestra un patrón de este modelo.

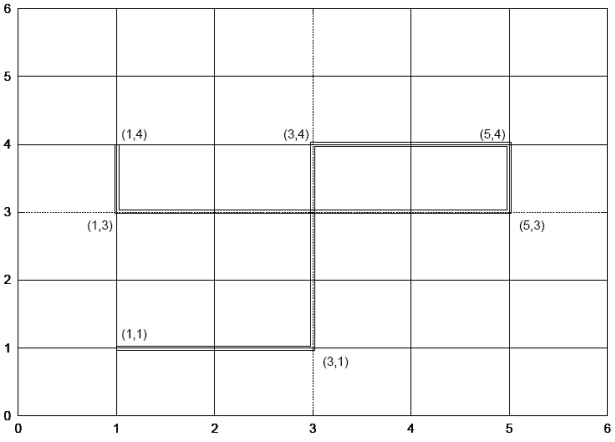


Figura 6.7: Patrón de movimiento de un nodo móvil usando el modelo de movilidad sección de una ciudad.

6.1.2 Modelos de Movilidad de Grupo

Modelo de movilidad correlación exponencial aleatoria: Un modelo de movilidad de grupo que utiliza una función de movimiento para crear movimientos.

Modelo de movilidad columnas: Un modelo de movilidad de grupo donde un conjunto de nodos móviles forman una línea y son movidos uniformemente hacia adelante en una dirección particular. La Figura 6.8 muestra un patrón de este modelo.

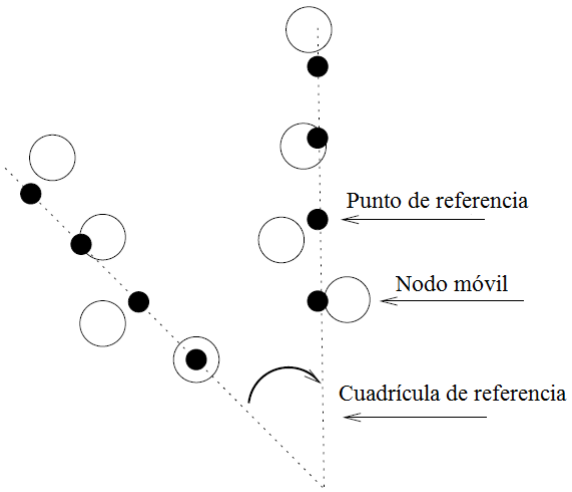


Figura 6.8: Movimiento de tres nodos móviles usando el modelo de movilidad por columnas.

Modelo de movilidad comunidad nómada: Un modelo de movilidad de grupo donde un conjunto de nodos móviles se mueven juntos desde una locación hacia otra. La Figura 6.9 muestra un patrón de este modelo.

Modelo de movilidad persecución: Un modelo de movilidad de grupo donde un conjunto de nodos móviles siguen un blanco determinado. La Figura 6.10 muestra un patrón de este modelo.

Modelo de movilidad punto de referencia de grupo: Un modelo de movilidad de grupo donde los movimientos del grupo se basan en la camino recorrido por un centro lógico. La Figura 6.11 muestra un patrón de este modelo.

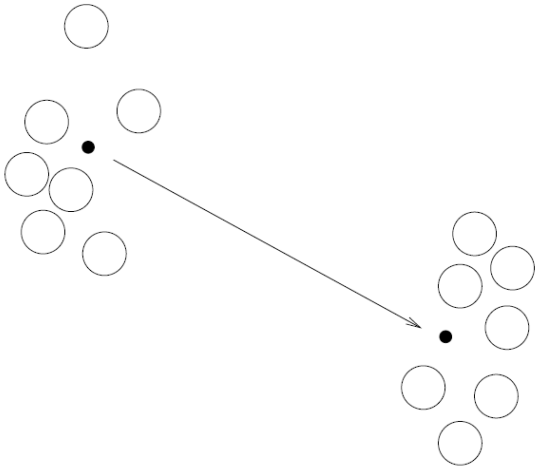


Figura 6.9: Movimientos de siete nodos móviles usando el modelo de movilidad comunidad nómada.

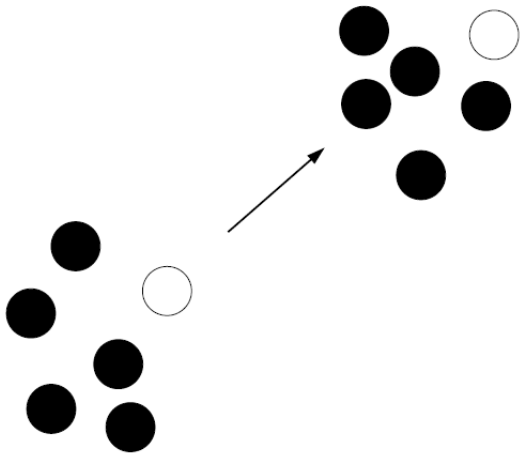


Figura 6.10: Movimientos de seis nodos móviles usando el modelo de movilidad de persecución.

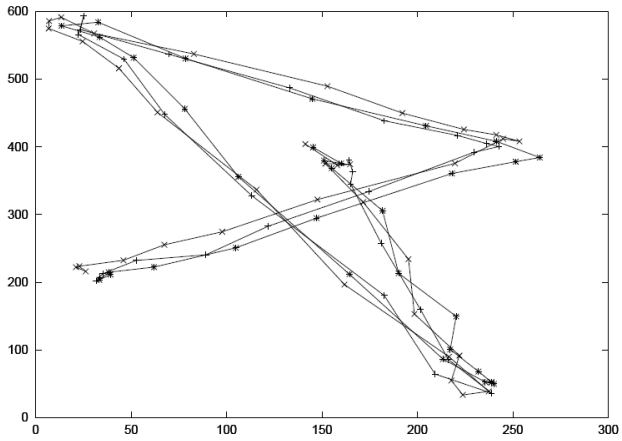


Figura 6.11: Patrón de movimiento de un grupo (tres nodos) usando el modelo de movilidad punto de referencia de grupo.

6.2 Comportamiento Susceptible al Uso de Energía en Escenarios de Nodos Móviles

Cross-over-net abstrae capas desde modelos de red diferentes independientemente de las tecnologías y protocolos que las gobiernan. Asi, la nueva abstracción desacopla el control de los modelos de red y los administra bajo una estrategia común. Consecuentemente, los mecanismos únicos que son utilizados en un modelo específico para organizar la red son habilitados para ser aplicados ubicuamente en todos los otros modelos de red que se encuentran bajo la administración SDN. En nuestro enfoque, el plano de control es desplegado en uno o más dispositivos de red con la capacidad requerida; de este modo, el riesgo de un punto crítico de fallo es minimizado. El control es centralizado a nivel abstracto pero es distribuido a nivel físico.

Con el objetivo de analizar el comportamiento del uso de energía en escenarios de nodos móviles se ha estudiado bajo ambiente de simulación la evolución del factor de red y el tiempo de vida de la red. Estas variables darán una idea de los comportamientos energéticos de nuestro enfoque comparado con un algoritmo distribuido común. También, se ha evaluado el envío de mensajes, el uso de información de control en la red y razones de cambio de estados de configuraciones de la red.

Se compara *Cross-over-net* contra Span porque este tipo de algoritmo de TC ejecuta más tareas de nodos coordinadores específicos que otros enfoques TC. También, Span agota menos mensajes de transmisiones entre las comunicaciones distribuidas cuando ocurre la fragmentación de la red.

Nuestro algoritmo opera entre la capa MAC y la capa de encaminamiento. El algoritmo puede ser considerado como una modificación complementaria de la lógica de encaminamiento. El controlador dinámicamente construye los grafos locales que contienen la información de las estructuras de vecinos, y vecinos de vecinos para cada nodo con el objetivo de analizar su utilidad para convertirse en coordinador. En nuestro alcance, el controlador maneja una red interna virtual para probar los cambios antes de enviar las actualizaciónes a los nodos; de este modo, los únicos nodos que reciben un mensaje de actualización son aquellos que están señalados para cambiar su configuración. Las idea es inundar la red con menos mensajes de

actualizacion y por consiguiente, minimizar la redundancia en busca de eficiencia energética.

6.2.1 Modelo de Red

Se utiliza un modelo de red para una WANET móvil N que está representado por:

$$N = \{(S_i, T_i)\}, \qquad i \in [0, n] \tag{6.1}$$

donde S_i es el nodo actual y T_i representa la energía de S_i. Iteramos i en el rango (0, n), donde n es el número total de nodos en la red N.

Los nodos vecinos de N son indicados por;

$$Neighbour_i = \{(S_{(i,j)}, T_{(i,j)})\}, \qquad j \in [0, t_i] \tag{6.2}$$

donde t_i denota el número de nodos que están en el rango de ser un vecino del nodo S_i. Iteramos j en el rango (0, t_i).

6.3 Ambiente Experimental

Se han utilizado simulaciones con el objetivo de estudiar el rendimiento de nuestra solución propuesta *Cross-over-net* y compararla contra Span, un conocido algoritmo de control de topologías. Usando el simulador de redes OMNeT++ se compara el consumo de energía, el tiempo de vida de la red y el conteo de saltos de mensajes, evaluando múltiples escenarios y repitiendo experimentos para diferentes densidades de nodos en las mismas condiciones iniciales.

Una revision de *Cross-over-net* para redes inalámbricas estáticas se llevó a cabo en el capítulo 5. De acuerdo a los resultados obtenidos, en tamaños pequeños de este tipo de redes, *Cross-over-net* obtiene reducciones en el consumo de energía, y mejora el tiempo de vida de la red. El rendimiento del algoritmo se degrada en las redes de gran tamaño, porque el uso de los nodos está relacionado al tamaño de la red. Para escenarios de movilidad observamos un comportamiento similar pero con cambios continuos en el grafo de red.

Se han simulado múltiples escenarios de red de 10, 20, 30 y 50 nodos de sensores inalámbricos en un área cuadrada de 475m x 475m. Los nodos en las simulaciones usan un rango de transmisión de 75 metros [147]. Por simplicidad, los servicios de descubrimiento de la red son considerados en un módulo separado de control. Además, hay n nodos sensores distribuidos aleatoriamente durante una simulación con un límite de tiempo de 30000s en cada escenario.

Los algoritmos de encaminamiento tienen una porfunda relación con la topología de una red. Existen enfoques que construyen una topología en una primera etapa y luego despliegan un algoritmo de encaminamiento sobre ella. Otros enfoques construyen una topología por demanda mientras corren el algoritmo de encaminamiento. SDN extiende el control sobre la topología y el encaminamiento desde que ambas entidades puedes ser administradas y analizadas individualmente o en una perspectiva híbrida. Como resultado, toda la administración topológica y de encaminamiento se vuelve personalizable por demanda. Este conocimiento esta disponible en el plano de control central; entonces, la red es capaz de obtener información valiosa para su comportamiento como: nodos aislados en los vecindarios, nodos con más conexiones, potenciales desconexiones que causen fragmentación de red y rutas relacionadas a cada nodo. Además, esta información es un

componente clave para deducir el consumo de energía de un algoritmo de encaminamiento específico. Consecuentemente, *Cross-over-net* habilita un esquema de encaminamiento que es capaz de seleccionar su tipo, de acuerdo, a las necesidades del consumo de energía. El método de configuración del encaminamiento considera aspectos dinámicos tales como: grafos estructurados que definen los vecindarios, las rutas a cada pasarela controladora, las acciones a ejecutar en caso de detectar un nodo afuera del grafo general de la red. Adicionalmente, esta capacidad puede ser configurada de acuerdo al tipo de tecnología y estandares utilizados por los dispositivos de red incluso en redes heterogéneas.

Todos los experimentos colocan el nodo controlador en el centro del área de simulación, pero este controlador es capaz de moverse como el resto de nodos. En una base de tiempo aleatoria, entre el número total de nodos, algunos nodos son seleccionados aleatoriamente para moverse y los otros permanecen estáticos. Se imita el movimiento siguiendo el modelo de movilidad de caminata aleatoria con una distancia de viaje configurada a 25m. Cada nodo elige una dirección aleatoria entre 0 y 2π, luego, al nodo se le permite viajar la distancia configurada por un intervalo aleatorio de tiempo. Periódicamente, el panel de control construye el nuevo grafo de red y un nuevo CDS usando el algoritmo descrito en el capítulo 4. Para obtener una comparación más exhaustiva, ejecutamos cada simulación 30 veces y sus valores promedios fueron calculados. La Tabla 6.1 muestra los principales parámetros iniciales de las simulaciones.

Parámetro	Valor
Área	475mx475m
Canal	Wireless Zigbee
Alcance(m)	75
Capacidad máxima de energía de los nodos	2500 mAH
Costo de transmisión(Tx)	30 mA
Costo de recepción(Rx)	30 mA
Número de nodos móviles	10,20,30,50
Límite de tiempo de simulación	30000s
Número de simulaciones	30

Tabla 6.1: Configuración de parámetros de la simulación

6.4 Evaluación

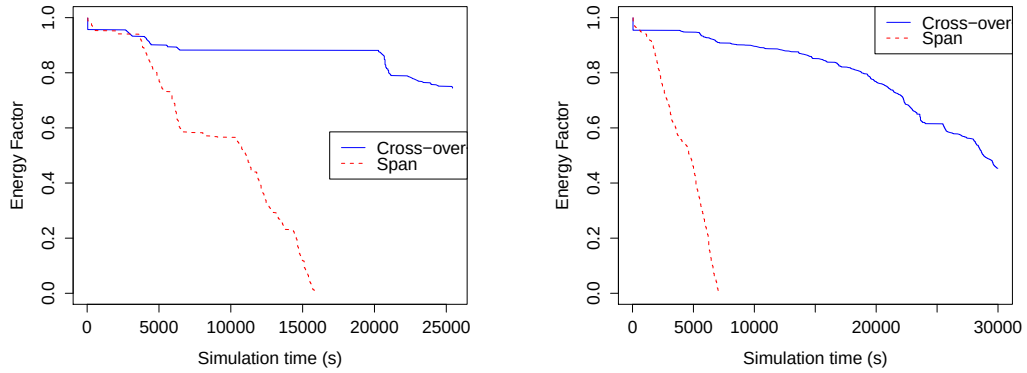
El objetivo principal de nuestro enfoque es ahorrar energía. Los residuos energéticos definen la utilidad de un nodo particular. La utilidad del nodo define el grafo de red y el subgrafo de nodos coordinadores. El algoritmo utiliza las entidades del grafo de red y el subgrafo de nodos coordinadores para configurar el esquema de encaminamiento. Por lo tanto, el enfoque de encaminamiento es capaz de construir decisiones de encaminamiento desde una perspectiva de capas aisladas de red o desde una perspectiva de capas combinadas de red. La abstracción central de control administra todos los procesos sin la reducción de los servicios de la red.

Una noción del consumo de energía es el factor de energía, como se discute en [148]. Supongamos que E_r represente la energía que tiene un nodo y que E_t representa el total de energía del nodo a su máxima capacidad. El factor de energía es definido como la razón E_r/E_t.

Las Figuras 6.12, 6.13 describen la evolución del total de factores de energía en una iteración aleatoria de nuestros experimentos. Como se espera, nuestra solución funciona mejor que la solución con un panel de control descentralizado, sin embargo, es evidente que cuando se incrementa el número de nodos, el impacto de los costos de inicialización son más altos. Así, las diferencias en los ahorros de energía entre los algoritmos van siendo cada vez más cortas. Esto se debe a la densidad de nodos y a la posición del controlador en cada caso. Los costes de comunicación se incrementan para el controlador cuando este tiene que manejar un grafo de red grande porque el controlador necesita mantener muchos más nodos actualizados.

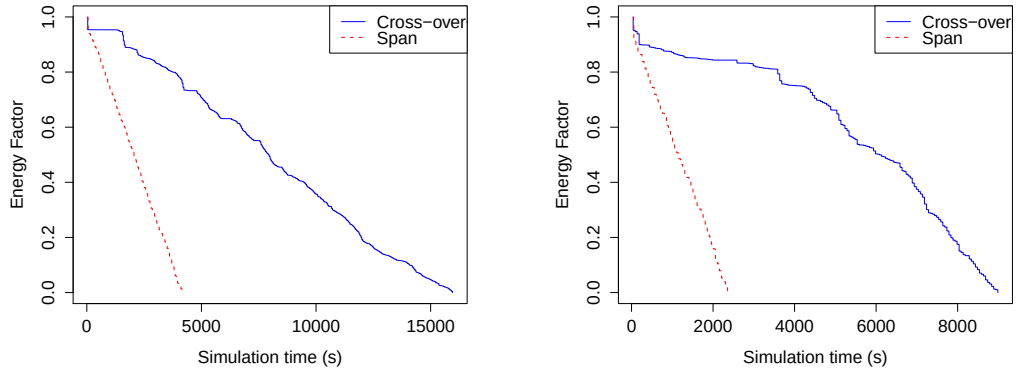
La solución propuesta trata de ahorrar energía reduciendo los "mensajes de petición" requeridos para anunciar las tareas de coordinación y no-coordinación. También, se obtiene una manera orquestada y coordinada de comunicarse con los vecinos, esto reduce el uso de mensajes de estado. Además, el algoritmo propuesto demuestra que los vecinos individuales y tablas de estadísticas pueden ser administradas con menos sobrecarga de mensajes.

Finalmente, la Figura 6.14 y tabla 6.1 describen el valor promedio en tiempo de simulación cuando cada escenario de red alcanza su agotamiento completo de energía. Se observa que nuestro algoritmo obtiene mejores valores en todos los escenarios de diferentes densidades de nodo. Se observa que en el escenario de 10



(a) n=10 (b) n=20

Figura 6.12: Comportamiento del factor de energía con densidades de 10 y 20 nodos



(a) n=30 (b) n=50

Figura 6.13: Comportamiento del factor de energía con densidades de 30 y 50 nodos

nodos, el agotamiento completo de energía de la red ocurre en *Cross-over-net* a los 26354s y en Span a 14177s, para un escenario de 20 nodos, el agotamiento completo de energía de la red ocurre en *Cross-over-net* a los 27775s y en Span a 7270s, para un escenario de 30 nodos, el agotamiento completo de energía de la red ocurre en *Cross-over-net* a los 16801s y en Span a 3707s, y para un escenario de 50 nodos, el agotamiento completo de energía ocurre en *Cross-over-net* a los 7620s y en Span a 2057s. Los resultados muestran que cuando incrementamos el número de nodos, nuestro algoritmo es penalizado con más costes de comunicación. Sin embargo, estos resultados muestran que incluso en un escenario de 50 nodos nuestra solución requiere menos consumo de energía.

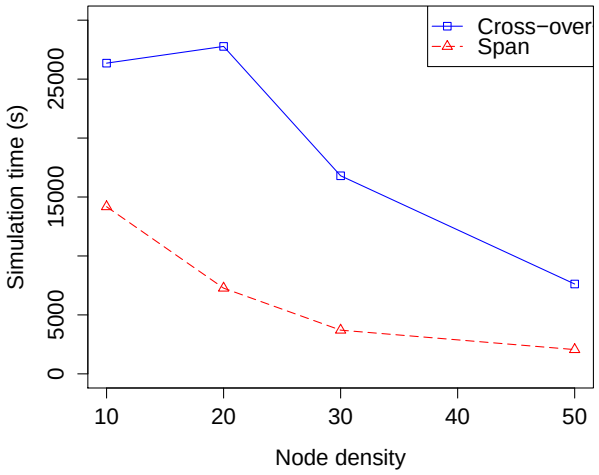


Figura 6.14: Evolución del factor de energía con diferentes densidades de nodos.

También, de la Figura 6.14 se concluye que *Cross-over-net* reduce el factor de energía en un 34 % en un escenario de 10 nodos, 40 % en un escenario de 20 nodos, 25 % en un escenario de 30 nodos y 21 % en un escenario de 50 nodos comparados contra Span. Estos resultados demuestran que *Cross-over-net* maneja el TC mejor en redes con un número de nodos entre 10-30.

6.4.1 Tiempo de Vida de la Red

En esta sección se llevan a cabo pruebas que muestran la evolución del tiempo de vida de la red con diferentes densidades de nodos. Se ha definido como el tiempo de vida de la red al tiempo transcurrido hasta cuando sucede la desactivación del primer nodo. La Figura 6.15 presenta los resultados de nuestras simulaciones considerando los valores de parámetros iniciales descritos en la Tabla 6.1. Cuando el número de nodos es 10, 20 y 30, el tiempo de vida de la red es más estable en *Cross-over-net*. El primer nodo muere en Span a los 4572s, 1716s y 1816s respectivamente en tiempo de simulación, mientras *Cross-over-net* presenta la muerte del primer nodo a los 11730s, 12223s y 1945s respectivamente. Se aprecia una extensión de un 34 % en el tiempo de vida de la red. Para un escenario de 50 nodos, el primer nodo muere en *Cross-over-net* a los 730s y en Span a los 1062s. Así, Span es más estable en escenarios de movilidad de gran tamaño, ya que en nuestro algoritmo el comportamiento de la red está relacionado con la densidad de nodos cerca del controlador.

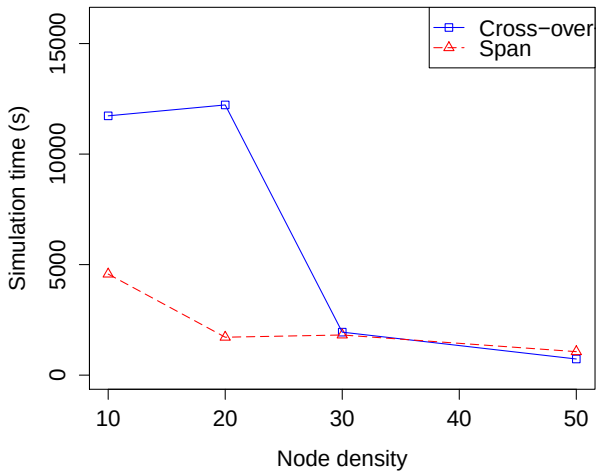


Figura 6.15: Evolución del tiempo de vida de la red con diferentes densidades de nodos.

6.4.2 Análisis de Número de Saltos de Paquetes

Esta sección compara el número de saltos entre los nodos sensores inalámbricos. El número de saltos es definido como el número de paquetes necesarios para anunciar los cambios de ruteo en cada vecindario. Las simulaciones siguen los mismos valores de parámetros inciales que describe la Tabla 6.1. Como se muestra en la Figura 6.16, nuestro algoritmo reduce 4 veces la actividad de paquetes comparada con el enfoque distribuido Span. Se observa que en un escenario de 10 nodos, el número de saltos usados es 595 en *Cross-over-net* y 822 en Span, para un escenario de 20 nodos, el número de saltos utilizados en Span es 1667 y el número de saltos en *Cross-over-net* disminuye a 658, para un escenario de 30 nodos, el número de saltos usados es 2432 en *Cross-over-net* y 2500 en Span. Sin embargo, para un escenario de 50 nodos ambos algoritmos usaron un número de saltos de 4167. Está claro que nuestra solución reduce el uso de paquetes cuando $n < 30$. Estos resultados prueban que un plano de control separado en una red móvil puede obtener ahorrros de energía y mejor tiempo de vida de la red con un razonable incremento en la complejidad del encaminamiento. Además, desde que en Span los nodos móviles toman decisiones solamente con información local; los nodos tienen que gastar mensajes para actualizar a sus vecinos los anuncios de encaminamiento y coordinación. En nuestro algoritmo podemos proveer esta actualización con la revisión de control de la red. Sin embargo, cuando se incrementa el número de nodos $(n > 30)$, el número de saltos utlizados tiende a ser similar. Estos resultados muestran que *Cross-over-net* baja su rendimiento cuando n es un número alto.

6.4.3 Múltiples Pasarelas de Acceso al Plano de Control

Se explora la posibilidad de colocar múltiples pasarelas controladoras en los escenarios simulados. Una pasarela controladora es una extensión del controlador colocado en la nube de Internet (**abstracción del plano de control**); de hecho, se puede considerar como la posición física del controlador central de red (**plano de control**) dentro de la WANET. Así, las rutas para encontrar la abstracción central del plano de control dependen de las posiciones y el número de pasarelas controladoras.

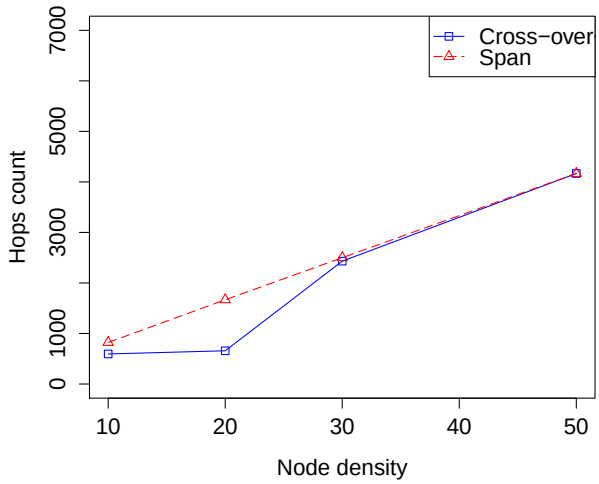


Figura 6.16: Evolución del número de saltos de mensajes con diferentes densidades de nodos.

Los escenarios y comportamientos que se analizan en esta sección siguen las pautas de la sección anterior 6.3. Sin embargo, se han considerado 1, 2, 3, y 4 pasarelas controladoras para cada escenario. Además, hay n nodos sensores distribuidos aleatoriamente durante una simulación con un límite de tiempo de 40000s en cada escenario.

En todos los experimentos simulados las pasarelas controladoras son capaces de moverse como el resto de nodos. Con el objetivo de proveer una comparación más exhaustiva, se ejecuta cada prueba de simulación 30 veces y luego se calculan sus valores promedio. La Tabla 6.2 muestra los principales parámetros de estas simulaciones.

6.4.3.1 Sensibilidad en Consumo Energético

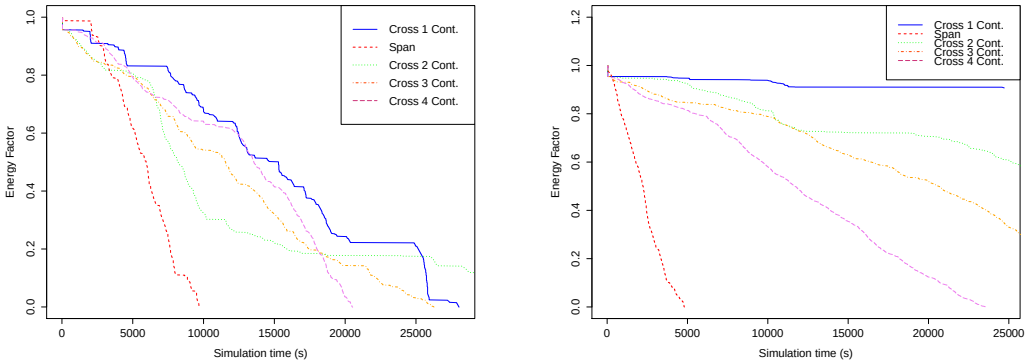
Las Figuras 6.17, 6.18 describen la evolución de los *factores de energía* en una iteración aleatoria de nuestros experimentos. Se observa que *Cross-over-net* reduce el consumo de energía en todos los escenarios al compararse con Span. Como es de esperar, cuando el número de pasarelas controladoras se incrementa, usamos más energía. Este comportamiento es producido por la cobertura amplificada de nodos

Parámetro	Valor
Área	475mx475m
Canal	Wireless Zigbee
Alcance(m)	75
Capacidad máxima de energía de los nodos	2500 mAH
Costo de transmisión(Tx)	30 mA
Costo de recepción(Rx)	30 mA
Número de nodos móviles	10,20,30,50
Límite de tiempo de simulación	40000s
Modelo de movilidad	Caminata Aleatoria
Número de iteraciones	30

Tabla 6.2: Configuración de parámetros de la simulación

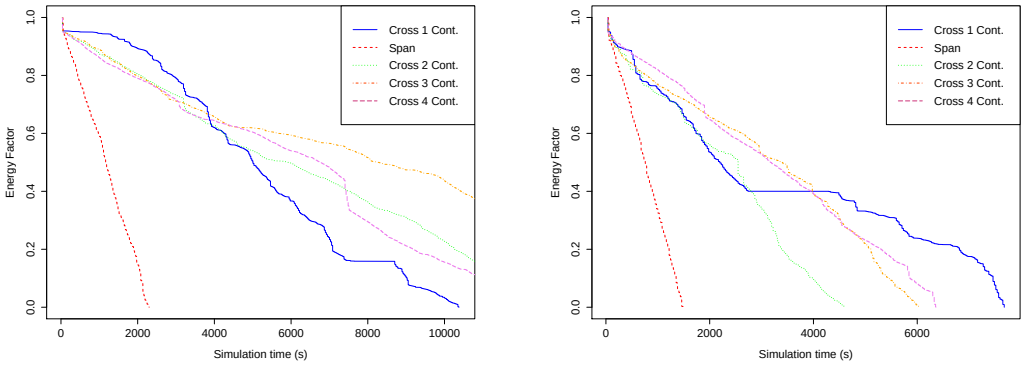
que se obtiene con más pasarelas controladoras; la fragmentación de la red decrece pero el consumo de energía se incrementa. Sin embargo, nuestra solución obtiene mejores ahorros de energía incluso con 4 pasarelas controladoras.

También, la Figura 6.19 describe el valor medio en tiempo de simulación en el cuál cada escenario de red alcanza su agotamiento completo de energía. Nuestro algoritmo obtiene mejores valores en todos los escenarios probados con diferentes densidades de nodos. Se observa que en los escenarios de 10, 20, y 30 nodos, los resultados más consistentes en rendimiento los presenta *Cross-over-net* en los despliegues con 3 y 4 pasarelas controladoras, porque se obtiene un excelente balance entre cobertura y gasto energético. No obstante, si se considera solamente la métrica de consumo de energía, el escenario de *Cross-over-net* con el despliegue de 2 pasarelas controladoras es la mejor solución. Los resultados muestran que *Cross-over-net* supera a Span con notables diferencias en los escenarios de 20 nodos. Finalmente, en los escenarios con 50 nodos, *Cross-over-net* se desempeña mejor que Span, pero todos los despliegues de pasarelas controladoras tienden a presentar resultados cercanos. Por lo tanto, la solución más efectiva es cuando usamos 2 pasarelas controladoras. La Tabla 6.3 muestra el resumen de los resultados específicos a cada escenario. Destacamos que cuando incrementamos el número



(a) n=10 (b) n=20

Figura 6.17: Comportamiento del factor de energía con densidades de 10 y 20 nodos



(a) n=30 (b) n=50

Figura 6.18: Comportamiento del factor de energía con densidades de 30 y 50 nodos

de nodos, nuestro algoritmo es penalizado con mayores costes de comunicación. Sin embargo, estos resultados muestran que incluso en un escenario con 50 nodos nuestra solución requiere menos consumo energético.

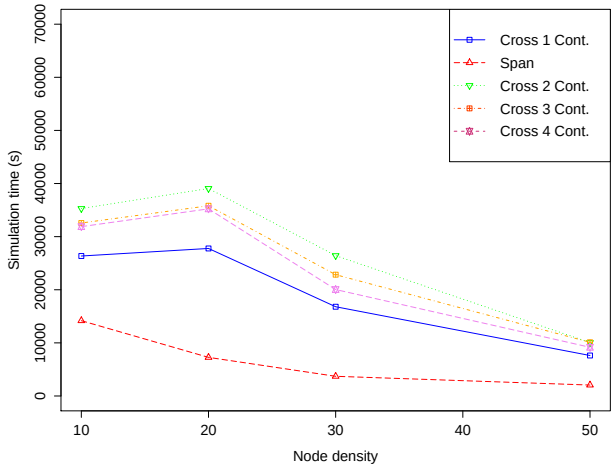


Figura 6.19: Evolución del factor de energía con diferentes densidades de nodos.

6.4.3.2 Sensibilidad en el Tiempo de Vida de la Red

En esta sección se han llevado a cabo pruebas que muestran la evolución del tiempo de vida de la red con diferentes densidades de nodos. La Figura 6.20 y la Tabla 6.3 presentan los resultados de los experimentos considerando los valores de los parámetros iniciales descritos en la Tabla 6.2. Como se esperaba, el número de pasarelas controladoras afecta el tiempo de vida de la red. Los mejores resultados son obtenidos con el despliegue de 2 pasarelas controladoras. Es evidente que, con 1 pasarela controladora, Span rinde mejor en un escenario de 50 nodos. Sin embargo, *Cross-over-net* es confiable en rendimiento nuevamente cuando desplegamos 2, 3, 4 pasarelas controladoras. En resumen, Span es más estable en escenarios de movilidad grandes cuando consideramos 1 pasarela controladora. No obstante, ya que el comportamiento de la red está relacionado con la densidad de nodos cercanos a una pasarela controladora, el despliegue de más de una pasarela controladora incrementa el tiempo de vida de la red completa eficientemente. Cabe destacar que

la inteligencia central es competente de mantener los servicios de red cuando diferentes nodos alcanzan el agotamiento de energía.

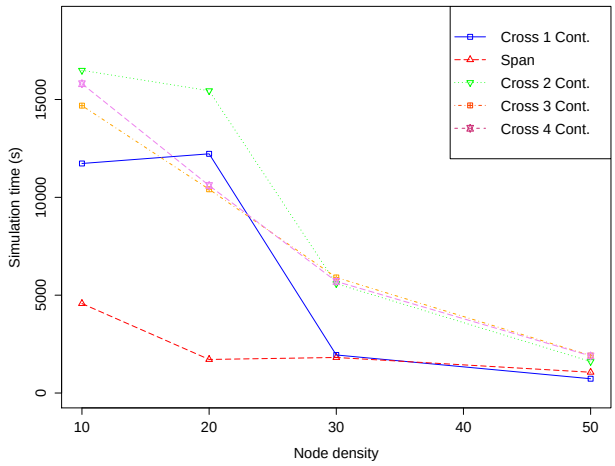


Figura 6.20: Evolución del tiempo de vida de la red con diferentes densidades de nodos.

6.4.3.3 Sensibilidad de el Número de Saltos de Paquetes

Esta sección compara el número de saltos de mensajes entre los nodos sensores inalámbricos. Las simulaciones siguen los mismos valores de los parámetros iniciales descritos en la Tabla 6.2. Como muestra la Figura 6.21, nuestro algoritmo reduce la actividad de paquetes 4 veces comparado con Span. Se obstienen resultados que muestran que en los escenarios con 10, 20, y 30 nodos, *Cross-over-net* usa menos saltos que Span. Como es lógico esperar, el número de saltos de mensajes se incrementa a medida que se agregan pasarelas controladoras a cada escenario, pero los resultados muestran que el número de saltos de mensajes usado por Span nunca es sobrepasado. Sin embargo, para un escenario de 50 nodos ambos algoritmos tienden a gastar toda la energía en el sistema; como resultado, el número de saltos de mensajes tiende a ser similar. Esta claro que nuestra solución reduce el uso de paquetes cuando $n < 30$.

Tabla 6.3: Comparación del factor de energía y tiempo de vida de la red con diferentes densidades de nodos.

Escenario	Cross-1Cont	Span	Cross-2Cont	Cross-3Cont	Cross-4Cont
10 nodos (Energy Factor)	26354s	14177s	35290s	32565s	31885s
20 nodos (Energy Factor)	27775s	7270s	39066s	35812s	35233s
30 nodos (Energy Factor)	16801s	3707s	26423s	22836s	20039s
50 nodos (Energy Factor)	7620s	2057s	10058s	10114s	9164s
10 nodos (Network Lifetime)	11730s	4572s	16492s	14686s	15808s
20 nodos (Network Lifetime)	12223s	1716s	15448s	10412s	10603s
30 nodos (Network Lifetime)	1945s	1816s	5588s	5906s	5703s
50 nodos (Network Lifetime)	730s	1062s	1610s	1915s	1894s

Este resultado muestra que *Cross-over-net* rinde mejor cuando n es pequeño. También, el plano de control está disponible para agregar nuevas métricas además del salto de paquetes, como por ejemplo, las métricas que estiman el encaminamiento basadas en la longitud de los enlaces entre nodos o rangos de movilidad de nodos. Además, nuestro algoritmo es capaz de desplegar un encaminamiento fiable basado en perspectivas eficientes de energía jerárquicas y de grupo. Esta funcionalidad incrementa la capacidad de tolerancia a fallos para ofrecer algunas rutas alternativas convenientes para enviar paquetes en la presencia de una falla de enlace o de nodo.

6.4.3.4 **Análisis de Uso de Nodos Coordinadores**

Un comportamiento clave para alcanzar nuestros objetivos de ahorro energético es el proceso de selección de coordinadores. La Figura 6.22, muestra la media de llamadas a coordinación lanzadas en el grupo de mensajes ControlCheck. Una llamada a coordinación se define como el número de nodos que cambian a coodinador en una iteración particular de revisión de la red. Se muestra que la necesidad de llamadas de coordinación es alta en Span cuando $n < 30$. Estos resultados implican que, en estos escenarios, nuestro enfoque centralizado beneficia la red en términos de consumo energéticos porque reducimos el número medio de mensajes que son necesarios para la selección de coordinadores. Es evidente también que el uso

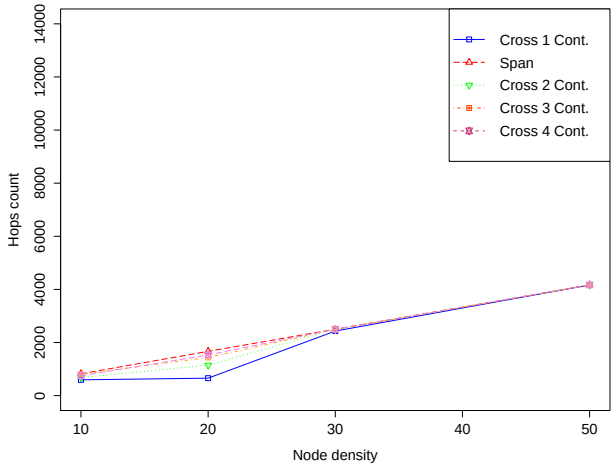


Figura 6.21: Evolución del número de saltos de mensajes con diferentes densidades de nodos.

de coodinadores es similar cuando desplegamos uno, dos, tres o cuatro pasarelas controladoras; como resultado, el enfoque distribuido de Span es más eficiente que *Cross-over-net* para administrar las llamadas a coordinación cuando $n = 50$. Consecuentemente, la figura 6.23 compara la media del número total de coordinadores usado en cada escenario y por cada iteración del proceso de revisión de red. Los resultados muestran que, en *Cross-over-net*, el número de coordinadores se incrementa a medida que agregamos nodos a la red. Sin embargo, Span tiende a usar menos coordinadores con respecto a *Cross-over-net* cuando el número de nodos de red se incrementa. Estos resultados implican que, cuando $n < 30$, *Cross-over-net* ahorra de mensajes de colisión/redundantes que se ocasionan en la operación distribuida mediante la reducción del número total de nodos coordinadores.

Adicionalmente, la información de coordinadores es recogida en el controlador. Luego, el plano de control utiliza la información para administrar el conocimiento de grafos que determina los comportamientos de la red. Así, se espera que el conocimiendo de grafos en el plano de datos se vuelva obsoleto dependiendo de la tasa de tiempo con la que es definida la frecuencia de los mensajes de control. Este tipo de sistemas automáticamente ejecuta cambios topológicos más fiables comparado con un sistema basado en un enfoque distribuido con grafos de red parciales. Sin

embargo, el plano de control puede requerir más tiempo para ejecutar los cálculos.

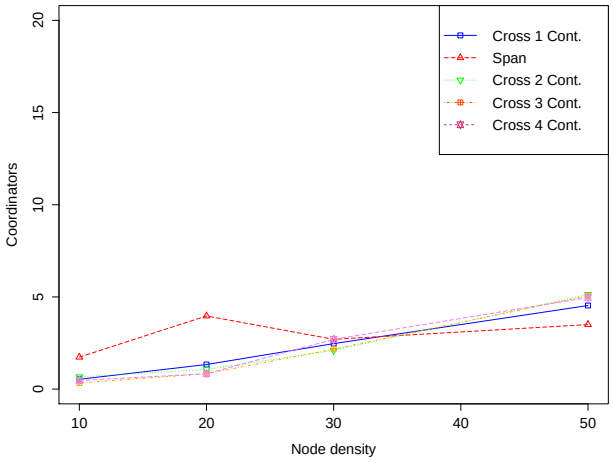


Figura 6.22: Llamadas a coordinación con diferentes densidades de nodos.

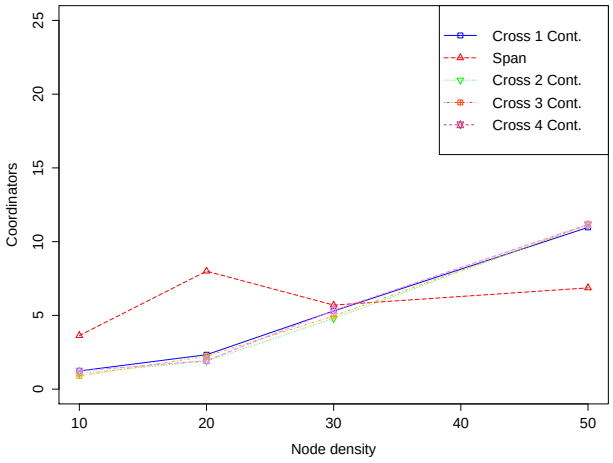


Figura 6.23: Número total de coordinadores con diferentes densidades de nodos.

6.5 Resumen

Este capítulo aborda los aspectos del consumo energético de WANETs móviles dentro de nuestra propuesta SDN. Al inicio se han considerado algunos antecedentes relacionados con la movilidad de nodos en una red para contextualizar el modelo de movilidad seleccionado para nuestras simulaciones. Luego, exponemos las directrices relacionadas con los comportamientos de nuestro modelo de red de nuestros escenarios simulados. Posteriormente evaluamos la habilidad del algoritmo para ahorrar energía. En dicha evaluación estudiamos como se comporta el factor de energía en iteraciones individuales sobre diversos despliegues de red. Asi mismo, estudiamos la evolución del factor energético en diferentes densidades de nodos. Luego, centramos nuestro análisis en la evolución del tiempo de vida de la red para determinar la capacidad del algoritmo de soportar los servicios de red. Después, analizamos el número de saltos de paquetes entre nodos de un vecindario; ya que, un ahorro en estos mensajes de comunicación significa también un ahorro energético. De hecho, nuestro algoritmo busca minimizar la necesidad de mensajes redundantes en los vecindarios para alcanzar mejores consumos energéticos. Luego, el capítulo se centra en analizar un experimento de sensibilidad del algoritmo donde se somete el factor energético, el tiempo de vida de la red y los saltos de paquetes entre nodos a diversos escenarios donde el acceso al plano de control se alcanza mediante múltiples números de pasarelas controladoras.

La tabla 6.4 indica, a forma de resumen, el algoritmo que mostró un mejor rendimiento dentro de cada despliegue experimentado. Observamos que nuestro algoritmo sobrepasa a un entorno distribuido como Span en la mayoría de los casos cuando $n < 50$.

	10 nodos		20 nodos		30 nodos		50 nodos	
	Cross	**Span**	**Cross**	**Span**	**Cross**	**Span**	**Cross**	**Span**
1 controlador	✓		✓		✓			✓
2 controladores	✓		✓		✓		✓	
3 controladores	✓		✓		✓		✓	
4 controladores	✓		✓		✓		✓	

Tabla 6.4: Resumen de mejores rendimientos de consumo energético en WANETs móviles

Adicionalmente, el capítulo analiza la tendencia de las llamadas a tareas de coordinación entre los nodos y la proyección del número total de coordinadores en la red. Esta información representa los umbrales de eficiencia que se logran en el uso de la información crítica del plano de control; porque, los coordinadores son los entes que darán forma los modelos de encaminamiento de la red.

La tabla 6.5 describe los escenarios donde *Cross-over-net* ejecutó un mejor uso de la información de coordinación; lo que también significa un mejor uso de los procesos de tratamiento de la información obsoleta.

	1 controlador	**2 controladores**	**3 controladores**	**4 controladores**
10 nodos		✓		
20 nodos	✓			
30 nodos		✓		
50 nodos		✓		

Tabla 6.5: Mejores rendimientos en uso de información de coordinación para Cross-over-net

Nuestro algoritmo alcanza los mejores rendimientos con respecto a la administración del consumo energético cuando se utilizan 2 pasarelas controladoras dentro del escenario con una densidad de 20 nodos. La misma situación se presenta con respecto al manejo de la información de control, ya que notamos que el mejor ren-

dimiento para el uso de la información de coordinación se presenta cuando la red cuenta con 2 pasarelas controladoras y 20 nodos.

A bit of information is a difference
which marks a difference.

Gregory Bateson

CAPÍTULO

7

Conclusiones

En este trabajo de investigación sugerimos un algoritmo que aborda el problema de consumo de energía en WANETs. Proponemos un enfoque SDN que habilita una separación de preocupaciones que convierte a los nodos de la red agnósticos con respecto a la administración del dominio IoT subyacente. Al mismo tiempo, los nodos no son dependientes de una aplicación ni de políticas de consulta de datos; como resultado, es fácil desplegar mecanismos TC y esquemas de ruteo.

Cross-over-net disminuye el número de mensajes de transmisión dentro de un vecindario de nodos; también, se reduce el retraso de tiempos usado en los enfoques distribuidos debido a la coordinación central de utilidades de los nodos. Sin embargo, esto significa un coste sobre el controlador, ya que este necesita más almacenamiento y capacidades de cálculo. Nuestros resultados muestran que con este enfoque obtenemos grandes mejoras en el consumo de energía preservando por más tiempo el tiempo de vida de la red en escenarios de nodos menores a 50 ($n < 50$) en WANETs estáticas y móviles.

Lo que resta de este capítulo está estructurado de la siguiente manera: la sección 7.1 detalla el contexto de las conclusiones finales y mejoras logradas con este trabajo de investigación. Luego, la sección 7.2 presenta un resumen de las contribuciones realizadas en el área de redes inalámbricas. Después, la sección 7.3 describe publicaciones relevantes divulgadas que tienen su origen en esta tesis. Finalmente,

en la sección 7.4 se mencionan algunas líneas abiertas de investigación relacionadas con el presente trabajo.

7.1 Conclusiones Finales

En este trabajo de investigación abordamos el problema del consumo de energía en WANETs, sugiriendo un algoritmo que ahorra energía haciendo uso de un control de topologías dentro del enfoque SDN. Una vez que los nodos no son dependientes de una aplicación y de políticas de consulta de datos, estos pueden ser fácilmente reiniciados y administrados. De esta forma, *Cross-over-net* disminuye el número de mensajes de control dentro del vecindario del nodo. También, debido a la coordinación centralizada alcanzada por SDN se evitan los retrasos de tiempo usados en enfoques distribuidos. Nuestros resultados muestran que *Cross-over-net* traduce estas reducciones en ahorros de energía, e incrementan el ciclo de vida en redes donde los nodos son menores a 50 ($n < 50$).

En consecuencia, para los futuros escenarios IoT con WANETs en la base de su modelo de arquitectura, se justifica un entorno SDN por su flexibilidad en las políticas de administración de topologías de red, modos de operación y encaminamiento, así como, convertir el entorno IoT agnóstico a su tecnología subyacente de administración. De igual forma, al centrar la sensibilidad energética de las WANETs dentro del entorno SDN, también se logra administrar una base de conocimiento de la red y sus comunicaciones. Este nuevo conocimiento permite cambiar las topologías de la red de acuerdo a un aprendizaje de los patrones del usuario, movilidad del usuario y características de la capa de infraestructura. También, al integrar este modelo con las tecnologías de la nube es posible la creación de planos de datos abiertos y estandarizados que permitan a cualquier proveedor de internet aplicar su manejo de políticas personalizadas de tráfico de red.

La solución de este trabajo de investigación propone el entorno SDN para WANETs como la arquitectura base que proporciona las capacidades para soportar el uso limitado de energía, también presenta un algoritmo para mejorar el uso del control de topologías de la red completa. La principal característica de nuestro control de topologías es la habilidad de los nodos de comunicar información en una manera coordinada y una nueva inteligencia que puede aplicar el controlador al comportamiento de la red. También, este modo de operación habilita una separación de preocupaciones que vuelve a los nodos de la red independientes del dominio IoT, ya que, únicamente necesita entenderlos como unas abstracciones de control comunes

para toda la red. En consecuencia, *Cross-over-net* disminuye el número de mensajes de estado dentro de un vecindario de nodos reduciendo una media del 30 % en el consumo de energía. Nuestras evaluaciones también muestran que *Cross-over-net* presenta un buen rendimiento en WANETs (móviles y estáticas) que tienen una densidad menor a 50 nodos.

Finalmente, el trabajo de investigación proporciona evidencias para confirmar las siguientes afirmaciones:

- El enfoque propuesto en este trabajo de investigación cumple el objetivo general expuesto en la sección 1.3 y muestra que el despliegue del entorno SDN y la centralización de un plano de control para WANETs obtiene menos pérdidas de mensajes y los nodos no son dependientes de una aplicación; no obstante, el controlador (o controladores) necesita más capacidad de almacenamiento y cálculo debido a que sus tareas tienen un alcance completo de red, asi como cantidades de información más complejos que procesar.

- Para obtener ahorros significativos de energía, destacamos que las variables de densidad de nodos, frecuencia de transmisión de los paquetes de control de red y la posición del controlador tienen un impacto importante en los resultados finales. Esto aplica tanto para entornos de redes estáticas como redes móviles. El trabajo realizado para llegar a está conclusión aporta evidencia para cumplir con el objetivo específico 3.

- La manera coordinada de controlar la red reduce el uso de mensajes de paquetes requeridos en los nodos individuales para anunciar la elección o retiro de tareas de coordinación. Además, la información recolectada se vuelve obsoleta en una mayor proporción de tiempo respecto al enfoque distribuido.

- El controlador es capaz de manejar una base de conocimiento de la red completa y cambios en la topología de la red de acuerdo a patrones de aprendizaje o características personalizadas de infraestructura. Dicha base de conocimiento puede ser extendida para aplicarle conceptos de inteligencia artificial, algoritmos *machine learning* o algoritmos de análisis de datos que

creen nuevo conocimiento útil para los servicios de la red. El trabajo realizado para llegar a está conclusión aporta evidencia para cumplir con el objetivo general.

- Para preservar ahorros significativos de energía, notamos que el número de pasarelas controladoras y las posiciones de las pasarelas controladoras tienen un impacto profundo en los resultados finales. Obtenemos mejores resultados de preservación de energía con 2 pasarelas controlador, pero con una cobertura limitada de nodos respecto a los escenarios con 3 y 4 pasarelas controladoras. El mejor despliegue dependerá de los requerimientos de la red y los casos de uso. El trabajo realizado para llegar a está conclusión aporta evidencia para cumplir con el objetivo específico 2.

- La tasa de cambio de nodos coordinadores y la tasa de uso de nodos coordinadores mejora desde que se utiliza un enfoque de plano de control centralizado. Esta mejora es más significativa en entornos de redes estáticas; ya que, las posiciones de los nodos no cambian en el tiempo por lo que se reducen las variables sobre las que depende el control de la red. El trabajo realizado para llegar a está conclusión aporta evidencia para cumplir con el objetivo específico 1.

- Con los datos y la información proporcionada en los entornos de simulación de redes WANETs (estáticas y móviles) de este trabajo de investigación, se concluye que la hipótesis expuesta en la sección 1.2 es verdadera. Por lo tanto, la solución descrita incrementa el tiempo de vida de las redes WANETs en términos de consumo energético.

- La separación de preocupaciones y abstracciones de *Cross-over-net* facilita su despliegue en una arquitectura RESTful API que considere los futuros procesos de identificación de objetos, propiedades y servicios dentro de los diferentes dominios IoT.

7.2 Contribuciones

Un resumen de las principales contribuciones de esta tesis se presenta a continuación.

- El diseño de la arquitectura que soporta nuestro algoritmo es descrito en el Capítulo 4. Esta contribución aborda el objetivo general y los objetivos específicos número 1 y 2(Sección 1.3).
  - Se sugiere una arquitectura que adopta SDN para incrementar el tiempo de vida de las WANETs en términos de consumo de energía de sus nodos.
  - Se presentan las directrices de control de un algoritmo que funciona administrando las capa de control y la capa de datos desde una perspectiva de consumo energético.
  - Una propuesta de un enfoque que vuelve el plano de control agnóstico a las capas de red subyacentes habilitando que la red acepte comandos externos independientes para controlar su topología por demanda en tiempos de ejecución.
  - Se propone un algoritmo de encaminamiento que mejora el proceso de control de tráfico en términos de redundancia de paquetes y detección de errores debido a su abstracción de control centralizada en uno o varias entidades controladoras.
- Un enfoque de aplicación de nuestro algoritmo en escenarios de WANETs estáticas es presentado en el Capítulo 5. Esta contribución aborda el objetivo general y los objetivos específicos número 2 y 3(Sección 1.3).
  - Comparación entre el algoritmo con plano de control centralizado propuesto y un enfoque distribuido (SPAN) para analizar los comportamientos de gasto energético, tiempo de vida de la red y tráfico de paquetes en WANETs estáticas.
  - Se proporciona un modelo de simulación para estudiar el efecto de aplicar un enfoque SDN en WANETs estáticas.

- Las consideraciones para la aplicación de nuestro algoritmo en escenarios de WANETs móviles es descrito en el Capítulo 6. Esta contribución aborda el objetivo general y los objetivos específicos número 2 y 3(Sección 1.3).
  - Comparación entre el algoritmo con plano de control centralizado propuesto y un enfoque distribuido (SPAN) para analizar los comportamientos de gasto energético, tiempo de vida de la red y tráfico de paquetes en WANETs móviles.
  - Dentro de nuestro enfoque propuesto aportamos un análisis de sensibilidad con relación al despliegue de uno y varios controladores físicos, así es posible estudiar el cambio que se produce en los tiempos en que la información se vuelve obsoleta, el tráfico de paquetes y el consumo energético para cada uno de los distintos escenarios.
  - Se proporciona un modelo de simulación para estudiar el efecto de aplicar un enfoque SDN en WANETs móviles.

7.3 Publicaciones Relevantes

La contribuciones de la sección anterior se han divulgado entre la comunidad científica a través de conferencias, publicaciones y talleres.

Particularmente, las siguientes publicaciones, surgidas de este trabajo de investigación, abordan como ahorrar energía utilizando el paradigma SDN en redes inalámbricas:

- J. Aparicio, J. J. Echevarria, and J. Legarda, "A Software Defined Networking Approach to Improve the Energy Efficiency of Mobile Wireless Sensor Networks," in Journal *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 2017.

- J. Aparicio, J. Legarda, J. Larranaga, and J. J. Echevarria, "Cross-over-net: An energy-aware coordination algorithm for WANETs based on software-defined networking," in *2015 23rd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 2015, pp. 37-41.

7.4 Líneas Abiertas de Investigación

Los capítulos previos de está investigación han descubierto posibles líneas de trabajo futuras. Dichas líneas de investigación abiertas se describen a continuación.

- *Integración de representaciones de conocimiento relacionadas con la inteligencia artificial para la toma de decisiones sobre servicios de la red.* La solución actual presenta una enorme flexibilidad para adaptarse a las nuevas tendencias de incorporación de conocimiento en los algoritmos de operación. Así, su arquitectura con un plano de control centralizado facilita el despliegue de algoritmos de inteligencia artificial en dicho plano de control, ya que la aplicación de los comportamientos de inteligencia artificial son independientes de los dispositivos subyacentes. Por lo tanto, es necesario construir interfaces que acoplen las actuales representaciones de conocimiento relacionada con inteligencia artificial a redes que administran dominios IoT desde una perspectiva de red programable como SDN.

- *Integración de algoritmos machine learning para el control de estadísticas en la inteligencia de la red.* La propuesta actual recoje en una sola entidad (controlador del plano de control) un cúmulo de información del comportamiento de la red y sus nodos individuales. Esta información centralizada es un conocimiento que puede ser analizado con algoritmos de machine learning para la toma de decisiones de operación más informadas. Por ejemplo, podrían aplicarse algoritmos de aprendizaje no supervisado para detectar patrones en grupos de estadísticas que capturen nuevo conocimiento en el uso de vecindarios de nodos. Luego, es posible cambiar los algoritmos de encaminamiento dentro de los vecindarios de nodos de acuerdo al despliegue que logre mayores beneficios según nuestros objetivos.

- *Acople con tecnologías de virtualización en las redes del futuro.* Nuestro enfoque *Cross-over-net* se basa en el paradigma SDN. La comunidad científica está realizando esfuerzos en integrar SDN con tecnologías de virtualización como NVF. Hay todo un nuevo campo de investigación para habilitar la virtualización en los enfoques como *Cross-over-net* que se dedican a orquestar

dipositivos dentro de las redes del futuro IoT. Existen posibilidades de virtualizar entidades especifícas o funcionalidades por demanda; por ejemplo, desplegar controladores virtuales, implementar monitoreo de actividad desde entidades virtuales o controlar la seguridad desde una capa virtual.

- *Autogestión de redes heterogéneas y ambientes inteligentes.* Con el uso de SDN y la virtualización en redes se abren nuevas posibilidades a creación de entidades que controlen y encapsulen una de serie de funcionalidades críticas para los servicios de red. Entonces, la programabilidad de dichas entidades se hace efectiva y habilita la posibilidad de contar con una red que se autogestione automáticamente. No obstante, se deben definir los umbrales que disparen los procesos de regulación, las bases de conocimiento sobre las que se toman las decisiones, las categorías de funcionalidades que orquestará cada entidad y su alcance dentro de los dispositivos de red. También, dicha autogestión puede desplegarse de manera que se administren varios tipos de red al mismo tiempo, lo que beneficia la administración de redes para dominios IoT.

- *Enfoques con una inteligencia (plano de control) nómada.* Una vez definido e alcance de nuestra propuesta es posible explorar algunas extensiones. Una opción interesante es explorar extensiones de las funcionalidades como la distribución de las tareas del controlador entre nodos. De esta forma, la red se convierte en un administrador por demanda del plano de control y del plano de datos.

- *Abordar los inconvenientes del uso del canal de control.* Las mejoras en el gasto energético pueden aún ser mayores si se analiza el uso del canal de control. Así, es posible determinar algoritmos de uso óptimo para la configuración de las transmisiones de control durante el tiempo de operación de la red. También, existe la posibilidad de implementar mecanismos de manejo de colas en la mensajería de paquetes de control de la red.

Bibliografía

[1] D. Guinard, "Web of things application architecture, integrating the real-world into the Web," 2011. 1

[2] G. Suciu, S. Halunga, A. Vulpe, and V. Suciu, "Generic platform for IoT and cloud computing interoperability study," in *2013 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, pp. 1–4, July 2013. 1

[3] X. Jia, "RFID technology and its applications in Internet of Things (IoT)," in *Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2012 2nd International Conference on*, pp. 1282–1285. 2

[4] L. Jiang, L. D. Xu, H. Cai, Z. Jiang, F. Bu, and B. Xu, "An IoT-Oriented Data Storage Framework in Cloud Computing Platform," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, pp. 1443–1451, May 2014. 2

[5] H. Cai, L. D. Xu, B. Xu, C. Xie, S. Qin, and L. Jiang, "IoT-Based Configurable Information Service Platform for Product Lifecycle Management," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, pp. 1558–1567, May 2014. 2

[6] L. D. Xu Editor-in Chief, "Inaugural issue," *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 1, pp. 1–2, Mar. 2016. 3

[7] L. Feeney and M. Nilsson, "Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment," in *IEEE INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer*

and Communications Societies. Proceedings, vol. 3, pp. 1548–1557 vol.3, 2001. 4

[8] C. Buschmann and D. Pfisterer, "iSense: A Modular Hardware and Software Platform for Wireless Sensor Networks." 4, 49

[9] R. Kalidindi, L. Ray, R. Kannan, and S. Iyengar, "Distributed energy aware mac layer protocol for wireless sensor networks," in *International conference on Wireless Networks*, pp. 282–286, 2003. 4, 48

[10] S. Baolin and L. Layuan, "On the reliability of MAODV in ad hoc networks," in *2005 IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, vol. 2, pp. 1514–1517 Vol. 2, Aug. 2005. 45

[11] A. Kansal and F. Zhao, "Fine-grained Energy Profiling for Power-aware Application Design," *SIGMETRICS Perform. Eval. Rev.*, vol. 36, pp. 26–31, Aug. 2008. 4, 49

[12] M. Chen, "Towards smart city: M2m communications with software agent intelligence," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 67, pp. 167–178, Nov. 2013. 5

[13] J. Gubbi, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future generation computer systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, 2013. 16

[14] M. A. Feki, "The Internet of Things: The Next Technological Revolution," *Computer*, vol. 46, no. 2, pp. 24–25. 16

[15] H. Zhang and L. Zhu, "Internet of Things: Key technology, architecture and challenging problems," in *2011 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE)*, vol. 4, pp. 507–512, June 2011. 16

[16] M. H. Florian Michahelles, *Architecting the Internet of Things*. Springer-Verlag, 1 ed., 2011. 16

[17] slange, “Internet of Things - Architecture — IOT-A: Internet of Things Architecture.” 16

[18] D. Christin, A. Reinhardt, P. S. Mogre, and R. Steinmetz, *Wireless Sensor Networks and the Internet of Things: Selected Challenges*. 16

[19] L. D. Xu, W. He, and S. Li, “Internet of Things in Industries: A Survey,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, pp. 2233–2243, Nov. 2014. 16

[20] H. Yan, L. D. Xu, Z. Bi, Z. Pang, J. Zhang, and Y. Chen, “An emerging technology – wearable wireless sensor networks with applications in human health condition monitoring,” *Journal of Management Analytics*, vol. 2, pp. 121–137, Apr. 2015. 16

[21] A. Whitmore, A. Agarwal, and L. D. Xu, “The Internet of Things—A survey of topics and trends,” *Information Systems Frontiers*, vol. 17, pp. 261–274, Mar. 2014. 17

[22] G. Abdul-Salaam, A. H. Abdullah, M. H. Anisi, A. Gani, and A. Alelaiwi, “A comparative analysis of energy conservation approaches in hybrid wireless sensor networks data collection protocols,” *Telecommunication Systems*, vol. 61, pp. 159–179, Jan. 2016.

[23] M. H. Anisi, G. Abdul-Salaam, M. Y. I. Idris, A. W. A. Wahab, and I. Ahmedy, “Energy harvesting and battery power based routing in wireless sensor networks,” *Wireless Networks*, vol. 23, pp. 249–266, Jan. 2017. 4

[24] Yi-Han XU, Yin WU, and Jun SONG, “A Routing Metric to Improve Route Stability in Mobile Wireless Sensor Networks,” *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, vol. 10, May 2016. 24

[25] M. H. Anisi and A. H. Abdullah, “Efficient Data Reporting in Intelligent Transportation Systems,” *Networks and Spatial Economics*, vol. 16, pp. 623–642, June 2016. 24

[26] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," *Computer Networks*, vol. 52, pp. 2292–2330, Aug. 2008. 18

[27] W. Zhou, "Research on architecture of the internet of things," in *System of Systems Engineering (SoSE), 2012 7th International Conference on*, pp. 870–872. 18

[28] A. Papadimitriou, D. Katsaros, and Y. Manolopoulos, "Social Network Analysis and Its Applications in Wireless Sensor and Vehicular Networks," in *Next Generation Society. Technological and Legal Issues* (A. B. Sideridis and C. Z. Patrikakis, eds.), no. 26 in Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, pp. 411–420, Springer Berlin Heidelberg, 2010. 19

[29] J. Qadir, N. Ahmed, and N. Ahad, "Building Programmable Wireless Networks: An Architectural Survey," *arXiv:1310.0251 [cs]*, Oct. 2013. 20

[30] Z.-j. Han and W. Ren, "A Novel Wireless Sensor Networks Structure Based on the SDN," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2014, p. e874047, Mar. 2014. 21

[31] D. J. Wetherall, J. V. Guttag, and D. L. Tennenhouse, "ANTS: a toolkit for building and dynamically deploying network protocols," in *1998 IEEE Open Architectures and Network Programming*, pp. 117–129, Apr. 1998. 24

[32] D. S. Alexander, W. A. Arbaugh, M. W. Hicks, P. Kakkar, A. D. Keromytis, J. T. Moore, C. A. Gunter, S. M. Nettles, and J. M. Smith, "The SwitchWare active network architecture," *IEEE Network*, vol. 12, pp. 29–36, May 1998. 25

[33] A. W. Group, *Architectural Framework for Active Networks*. 1998. 25

[34] J. E. v. d. Merwe, S. Rooney, L. Leslie, and S. Crosby, "The Tempest-a practical framework for network programmability," *IEEE Network*, vol. 12, pp. 20–28, May 1998. 25

[35] "hjp: doc: RFC 3292: General Switch Management Protocol (GSMP) V3." 25

[36] "hjp: doc: RFC 3746: Forwarding and Control Element Separation (ForCES) Framework." 25

[37] N. Feamster, H. Balakrishnan, J. Rexford, A. Shaikh, and J. van der Merwe, "The Case for Separating Routing from Routers," in *Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Future Directions in Network Architecture*, FDNA '04, (New York, NY, USA), pp. 5–12, ACM, 2004. 26

[38] T. V. Lakshman, T. Nandagopal, R. Ramjee, K. Sabnani, and T. Woo, "The SoftRouter Architecture," in *In ACM HOTNETS*, 2004. 26

[39] Karthik Lakshminarayanan, Ion Stoica, Scott Shenker, and Jennifer Rexford, "Routing as a Service." 26

[40] "hjp: doc: RFC 4655: A Path Computation Element (PCE)-Based Architecture." 26

[41] D. Raychaudhuri, N. B. Mandayam, J. B. Evans, B. J. Ewy, S. Seshan, and P. Steenkiste, "CogNet: An Architectural Foundation for Experimental Cognitive Radio Networks Within the Future Internet," in *Proceedings of First ACM/IEEE International Workshop on Mobility in the Evolving Internet Architecture*, MobiArch '06, (New York, NY, USA), pp. 11–16, ACM, 2006. 27

[42] J. Van der Merwe, A. Cepleanu, K. D'Souza, B. Freeman, A. Greenberg, D. Knight, R. McMillan, D. Moloney, J. Mulligan, H. Nguyen, M. Nguyen, A. Ramarajan, S. Saad, M. Satterlee, T. Spencer, D. Toll, and S. Zelingher, "Dynamic Connectivity Management with an Intelligent Route Service Control Point," in *Proceedings of the 2006 SIGCOMM Workshop on Internet Network Management*, INM '06, (New York, NY, USA), pp. 29–34, ACM, 2006. 27

[43] M. Casado, T. Garfinkel, A. Akella, M. J. Freedman, D. Boneh, N. McKeown, and S. Shenker, "SANE: A Protection Architecture for Enterprise Networks," in *Proceedings of the 15th Conference on USENIX Security Symposium - Volume 15*, USENIX-SS'06, (Berkeley, CA, USA), USENIX Association, 2006. 27

[44] M. Casado, M. J. Freedman, J. Pettit, J. Luo, N. McKeown, and S. Shenker, "Ethane: Taking Control of the Enterprise," in *Proceedings of the 2007 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*, SIGCOMM '07, (New York, NY, USA), pp. 1–12, ACM, 2007. 27

[45] N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan, G. Parulkar, L. Peterson, J. Rexford, S. Shenker, and J. Turner, "OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks," *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 38, pp. 69–74, Mar. 2008. 28

[46] E. Amir, S. McCanne, and R. Katz, "An Active Service Framework and Its Application to Real-time Multimedia Transcoding," in *Proceedings of the ACM SIGCOMM '98 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication*, SIGCOMM '98, (New York, NY, USA), pp. 178–189, ACM, 1998. 28

[47] Y. Yemini and S. D. Silva, "Towards Programmable Networks," in *in IFIP/IEEE International Workshop on Distributed Systems: Operations and Management*, 1996. 28

[48] O. Angin, A. T. Campbell, M. E. Kounavis, and R. R. F. Liao, "The mobiware toolkit: programmable support for adaptive mobile networking," *IEEE Personal Communications*, vol. 5, pp. 32–43, Aug. 1998. 28

[49] J. D. Touch, "X-Bone," tech. rep., Aug. 2003. 28

[50] L. Delgrossi and D. Ferrari, "A virtual network service for integrated-services internetworks," in *, Proceedings of the IEEE 7th International Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video, 1997*, pp. 291–295, May 1997. 29

[51] A. B. Kulkarni, G. J. Minden, R. Hill, Y. Wijata, A. Gopinath, S. Sheth, F. Wahhab, H. Pindi, and A. Nagarajan, "Implementation of a prototype active network," in *1998 IEEE Open Architectures and Network Programming*, pp. 130–142, Apr. 1998. 29

[52] J. Crowcroft, M. Fidler, K. Nahrstedt, and R. Steinmetz, "Is SDN the deconstraining constraint of the future internet?," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 43, pp. 13–18, Nov. 2013. 31

[53] H. Kim and N. Feamster, "Improving network management with software defined networking," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, pp. 114–119, Feb. 2013. 31

[54] P. Baskett, Y. Shang, W. Zeng, and B. Guttersohn, "SDNAN: Software-defined networking in ad hoc networks of smartphones," in *2013 IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, pp. 861–862, Jan. 2013. 32

[55] T. Luo, H.-P. Tan, and T. Quek, "Sensor OpenFlow: Enabling Software-Defined Wireless Sensor Networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 16, pp. 1896–1899, Nov. 2012. 32

[56] D. Zeng, T. Miyazaki, S. Guo, T. Tsukahara, J. Kitamichi, and T. Hayashi, "Evolution of Software-Defined Sensor Networks," in *2013 IEEE Ninth International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN)*, pp. 410–413, Dec. 2013. 32

[57] S. Alam, M. M. R. Chowdhury, and J. Noll, "SenaaS: An event-driven sensor virtualization approach for Internet of Things cloud," 2010. 32

[58] S. Paul and R. Jain, "OpenADN: Mobile apps on global clouds using OpenFlow and Software Defined Networking," in *2012 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 719–723, Dec. 2012. 32

[59] P. Dely, A. Kassler, and N. Bayer, "OpenFlow for Wireless Mesh Networks," in *2011 Proceedings of 20th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, pp. 1–6, July 2011. 32

[60] H. K. D. Sarma, A. Kar, and R. Mall, "Energy efficient and reliable routing for mobile wireless sensor networks," in *2010 6th IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems Workshops (DCOSSW)*, pp. 1–6, June 2010. 33

[61] M. Heni and R. Bouallegue, "Power control in reactive routing protocol for Mobile Ad Hoc Network," *arXiv:1205.1657 [cs]*, May 2012. arXiv: 1205.1657. 33

[62] E. Y. Rekhter, E. T. Li, and E. S. Hares, "A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)," 2005. 34

[63] R. Enns, "NETCONF Configuration Protocol." 35

[64] B. Pfaff and B. Davie, "The Open vSwitch Database Management Protocol." 35

[65] P. Saint-Andre, "Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP): Core." 36

[66] L. Berger, D. Frost, M. Bocci, L. Levrau, and S. Bryant, "A Framework for MPLS in Transport Networks." 36

[67] H. Karl, A. Wolisz, A. Willig, G. Goos, J. Hartmanis, and J. van Leeuwen, eds., *Wireless Sensor Networks*, vol. 2920 of *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. 37

[68] T. Miyazaki, S. Yamaguchi, K. Kobayashi, J. Kitamichi, S. Guo, T. Tsukahara, and T. Hayashi, "A software defined wireless sensor network," in *2014 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, pp. 847–852, Feb. 2014. 37

[69] L. J. G. Villalba, J. Bi, A. P. Jayasumana, and A. L. S. Orozco, "Advances on Software Defined Sensor, Mobile, and Fixed Networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 12, p. 5153718, Apr. 2016. 39

[70] S. Li, L. D. Xu, and S. Zhao, "The internet of things: a survey," *Information Systems Frontiers*, vol. 17, pp. 243–259, Apr. 2014. 41

[71] S. Shorgin, K. Samouylov, I. Gudkova, O. Galinina, and S. Andreev, "On the benefits of 5g wireless technology for future mobile cloud computing," in *Science and Technology Conference (Modern Networking Technologies) (MoNeTeC), 2014 International*, pp. 1–4, Oct. 2014. 42

[72] C. E. Perkins and P. Bhagwat, "Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers," in *Proceedings of the Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications*, SIGCOMM '94, (New York, NY, USA), pp. 234–244, ACM, 1994. 42

[73] P. Jacquet, P. Muhlethaler, T. Clausen, A. Laouiti, A. Qayyum, and L. Viennot, "Optimized link state routing protocol for ad hoc networks," in *Proceedings. IEEE International Multi Topic Conference, 2001. IEEE INMIC 2001. Technology for the 21st Century.*, pp. 62–68, 2001. 42

[74] M. G. Lewis, R. G. Ogier, and F. L. Templin, "Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF)." 42

[75] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," 2003. 42

[76] D. B. Johnson and D. A. Maltz, "Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks," in *Mobile Computing* (T. Imielinski and H. F. Korth, eds.), no. 353 in The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science, pp. 153–181, Springer US, 1996. DOI: 10.1007/978-0-585-29603-6_5. 42

[77] V. D. Park and M. S. Corson, "A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks," in *, Proceedings IEEE INFOCOM '97. Sixteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Driving the Information Revolution*, vol. 3, pp. 1405–1413 vol.3, Apr. 1997. 42

[78] A. S. Yuan, H. T. Fang, and Q. Wu, "OpenFlow based hybrid routing in Wireless Sensor Networks," in *2014 IEEE Ninth International Conference on*

Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), pp. 1–5, Apr. 2014. 42, 56

[79] C.-c. Chiang, H.-K. Wu, W. Liu, and M. Gerla, *Routing In Clustered Multihop, Mobile Wireless Networks With Fading Channel*. 1997. 43

[80] S. Murthy and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "An Efficient Routing Protocol for Wireless Networks," *Mob. Netw. Appl.*, vol. 1, pp. 183–197, Oct. 1996. 43

[81] G. Pei, M. Gerla, and T.-W. Chen, "Fisheye state routing: a routing scheme for ad hoc wireless networks," in *2000 IEEE International Conference on Communications. ICC 2000. Global Convergence Through Communications. Conference Record*, vol. 1, pp. 70–74 vol.1, 2000. 43

[82] M. S. Corson and A. Ephremides, "A distributed routing algorithm for mobile wireless networks," *Wireless Networks*, vol. 1, pp. 61–81, Mar. 1995. 44

[83] C.-K. Toh, "A novel distributed routing protocol to support ad-hoc mobile computing," in *Conference Proceedings of the 1996 IEEE Fifteenth Annual International Phoenix Conference on Computers and Communications*, pp. 480–486, Mar. 1996. 44

[84] R. Dube, C. D. Rais, K.-Y. Wang, and S. K. Tripathi, "Signal stability-based adaptive routing (SSA) for ad hoc mobile networks," *IEEE Personal Communications*, vol. 4, pp. 36–45, Feb. 1997. 44

[85] C. W. Wu and Y. C. Tay, "AMRIS: a multicast protocol for ad hoc wireless networks," in *IEEE Military Communications Conference Proceedings, 1999. MILCOM 1999*, vol. 1, pp. 25–29 vol.1, 1999. 45

[86] A. M. Jason Sie, Rajesh R. Talpade and M. Lu, "AMRoute: ad hoc multicast routing protocol." 45

[87] L. Ji and M. S. Corson, "A lightweight adaptive multicast algorithm," in *IEEE Global Telecommunications Conference, 1998. GLOBECOM 1998. The Bridge to Global Integration*, vol. 2, pp. 1036–1042 vol.2, 1998. 45

[88] S.-J. Lee, W. Su, and M. Gerla, "On-Demand Multicast Routing Protocol in Multihop Wireless Mobile Networks," *Mobile Networks and Applications*, vol. 7, pp. 441–453, Dec. 2002. 46

[89] J. J. Garcia-Luna-Aceves and E. L. Madruga, "A multicast routing protocol for ad-hoc networks," in *IEEE INFOCOM '99. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings*, vol. 2, pp. 784–792 vol.2, Mar. 1999. 46

[90] K. Chen and K. Nahrstedt, "Effective location-guided tree construction algorithms for small group multicast in MANET," in *IEEE INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings*, vol. 3, pp. 1180–1189 vol.3, 2002. 46

[91] L. Ji and M. S. Corson, "Differential destination multicast-a MANET multicast routing protocol for small groups," in *IEEE INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings*, vol. 2, pp. 1192–1201 vol.2, 2001. 46

[92] L. Layuan and L. Chunlin, "A QoS multicast routing protocol for mobile ad-hoc networks," in *International Conference on Information Technology: Coding and Computing (ITCC'05) - Volume II*, vol. 2, pp. 609–614 Vol. 2, Apr. 2005. 47

[93] Y.-S. Chen, T.-S. Chen, and C.-J. Huang, "SOM: spiral-fat-tree-based on-demand multicast protocol in a wireless ad-hoc network," *Computer Communications*, vol. 25, pp. 1684–1695, Nov. 2002. 47

[94] A. Koifman and S. Zabele, "RAMP: a reliable adaptive multicast protocol," in *Proceedings IEEE INFOCOM '96. Fifteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer Societies. Networking the Next Generation*, vol. 3, pp. 1442–1451 vol.3, Mar. 1996. 47

[95] H. Dhillon and H. Q. Ngo, "CQMP: a mesh-based multicast routing protocol with consolidated query packets," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2005*, vol. 4, pp. 2168–2174 Vol. 4, Mar. 2005. 47

[96] A. B. Mnaouer, L. Chen, C. H. Foh, and J. W. Tantra, "OPHMR: An Optimized Polymorphic Hybrid Multicast Routing Protocol for MANET," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 6, pp. 551–562, May 2007. 47

[97] C. E. Jones, K. M. Sivalingam, P. Agrawal, and J. C. Chen, "A Survey of Energy Efficient Network Protocols for Wireless Networks," *Wirel. Netw.*, vol. 7, pp. 343–358, Sept. 2001. 48

[98] L. F. W. v. Hoesel and P. J. M. Havinga, "A Lightweight Medium Access Protocol (LMAC) for Wireless Sensor Networks: Reducing Preamble Transmissions and Transceiver State Switches," (Tokio, Japan), pp. 205–208, Society of Instrument and Control Engineers (SICE), 2004. 48

[99] A. Aziz, Y. Sekercioglu, P. Fitzpatrick, and M. Ivanovich, "A Survey on Distributed Topology Control Techniques for Extending the Lifetime of Battery Powered Wireless Sensor Networks," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 121–144, 2013. 50

[100] B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, and R. Morris, "Span: An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks," *Wireless Networks*, vol. 8, pp. 481–494, Sept. 2002. 52

[101] G. Pantuza, F. Sampaio, L. Vieira, D. Guedes, and M. Vieira, "Network management through graphs in Software Defined Networks," in *2014 10th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*, pp. 400–405, Nov. 2014. 54

[102] H. Peng, W. Wang, C. Wang, G. Chen, and Y. Zhang, "A SDN-based energy saving strategy in wireless access networks," *China Communications*, vol. 12, pp. 132–145, Aug. 2015. 55

[103] T. Kanter, R. Rahmani, and A. Mahmud, "Conceptual Framework for Internet of Things'Virtualization via OpenFlow in Context-aware Networks," *arXiv:1401.7437 [cs]*, Jan. 2014. arXiv: 1401.7437. 56

[104] J. Nightingale, Q. Wang, J. M. Alcaraz Calero, E. Chirivella-Perez, M. Ulbricht, J. A. Alonso-López, R. Preto, T. Batista, T. Teixeira, M. J. Barros, and C. Reinsch, "QoE-Driven, Energy-Aware Video Adaptation in 5g Networks: The SELFNET Self-Optimisation Use Case," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 12, p. 7829305, Jan. 2016. 56

[105] Y. C. Tseng, Y. N. Chang, and B. H. Tzeng, "Energy-efficient topology control for wireless ad hoc sensor networks," *JOURNAL OF INFORMATION SCIENCE AND ENGINEERING*, vol. 20, pp. 27–37, Jan. 2004. 57

[106] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, and A. Passarella, "Energy conservation in wireless sensor networks: A survey," *Ad Hoc Networks*, vol. 7, pp. 537–568, May 2009. 57

[107] D. Pompili, A. Hajisami, and T. X. Tran, "Elastic resource utilization framework for high capacity and energy efficiency in cloud RAN," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, pp. 26–32, Jan. 2016. 57

[108] C. Ramirez-Perez and V. Ramos, "SDN meets SDR in self-organizing networks: fitting the pieces of network management," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, pp. 48–57, Jan. 2016. 58

[109] N. Li and J. Hou, "Topology control in heterogeneous wireless networks: problems and solutions," in *INFOCOM 2004. Twenty-third AnnualJoint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, vol. 1, pp.–243, Mar. 2004. 58

[110] R. Wattenhofer, L. Li, P. Bahl, and Y. M. Wang, "Distributed topology control for power efficient operation in multihop wireless ad hoc networks," in *Proceedings IEEE INFOCOM 2001. Conference on Computer Communications. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society (Cat. No.01CH37213)*, vol. 3, pp. 1388–1397 vol.3, 2001. 58

[111] F. O. Aron, T. O. Olwal, A. Kurien, and M. O. Odhiambo, "Energy Efficient Topology Control Algorithm for Wireless Mesh Networks," in *2008*

International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, pp. 135–140, Aug. 2008. 58

[112] T. Zhang, K. Yang, and H. H. Chen, "Topology control for service-oriented wireless mesh networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 16, pp. 64–71, Aug. 2009. 59

[113] R. Wattenhofer and A. Zollinger, "XTC: a practical topology control algorithm for ad-hoc networks," in *18th International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2004. Proceedings.*, pp. 216–, Apr. 2004. 59

[114] P. Santi, "Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks," *ACM Comput. Surv.*, vol. 37, pp. 164–194, June 2005. 59

[115] A. Naveed, S. S. Kanhere, and S. K. Jha, "Topology Control and Channel Assignment in Multi-Radio Multi-Channel Wireless Mesh Networks," in *2007 IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems*, pp. 1–9, Oct. 2007. 59

[116] P. Mudali, T. C. Nyandeni, N. Ntlatlapa, and M. O. Adigun, "Design and implementation of a topology control scheme for Wireless Mesh Networks," in *AFRICON 2009*, pp. 1–6, Sept. 2009. 59

[117] R. Ramanathan and R. Rosales-Hain, "Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment," in *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No.00CH37064)*, vol. 2, pp. 404–413 vol.2, 2000. 60

[118] Z. Yuanyuan, X. Jia, and H. Yanxiang, "Energy Efficient Distributed Connected Dominating Sets Construction in Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of the 2006 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing*, IWCMC '06, (New York, NY, USA), pp. 797–802, ACM, 2006. 60

[119] R. Rajaraman, "Topology Control and Routing in Ad Hoc Networks: A Survey," *SIGACT News*, vol. 33, pp. 60–73, June 2002. 60

[120] C. Donato, P. Serrano, A. d. l. Oliva, A. Banchs, and C. J. Bernardos, "An openflow architecture for energy-aware traffic engineering in mobile networks," *IEEE Network*, vol. 29, pp. 54–60, July 2015. 62, 66

[121] M. Mendonca, K. Obraczka, and T. Turletti, "The Case for Software-defined Networking in Heterogeneous Networked Environments," in *Proceedings of the 2012 ACM Conference on CoNEXT Student Workshop*, CoNEXT Student '12, (New York, NY, USA), pp. 59–60, ACM, 2012. 62

[122] x. Valdivieso Caraguay, N. Leonardo, A. Benito Peral, B. L&#xf3, L. I. Pez, Garc&#xed, and L. J. a Villalba, "SDN: Evolution and Opportunities in the Development IoT Applications," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2014, p. e735142, May 2014. 63

[123] I. Ku, Y. Lu, and M. Gerla, "Software-Defined Mobile Cloud: Architecture, services and use cases," in *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2014 International*, pp. 1–6, Aug. 2014. 63

[124] Z. Qin, G. Denker, C. Giannelli, P. Bellavista, and N. Venkatasubramanian, "A Software Defined Networking Architecture for the Internet-of-Things," 63

[125] J. R. d. A. Amazonas, G. Santos-Boada, and J. Solé-Pareta, "A critical review of OpenFlow/SDN-based networks," in *2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pp. 1–5, July 2014. 63

[126] H. H. Gharakheili, J. Bass, L. Exton, and V. Sivaraman, "Personalizing the Home Network Experience using Cloud-Based SDN," 64

[127] Z. Arslan, A. Alemdaroglu, and B. Canberk, "A traffic-aware controller design for next generation software defined networks," in *2013 First International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, pp. 167–171, July 2013. 64

[128] L. Galluccio, S. Milardo, G. Morabito, and S. Palazzo, "SDN-WISE: Design, prototyping and experimentation of a stateful SDN solution for WIreless

SEnsor networks," in *2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, pp. 513–521, Apr. 2015. 64

[129] R. Raghavendra, J. Lobo, and K.-W. Lee, "Dynamic Graph Query Primitives for SDN-based Cloudnetwork Management," in *Proceedings of the First Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks*, HotSDN '12, (New York, NY, USA), pp. 97–102, ACM, 2012. 64

[130] S. Paruchuri, "Future Infrastructure-Less Wireless Networking Environments: A Software Defined Network Approach," *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, vol. 4, no. 5, 2015. 65

[131] A. Hakiri and P. Berthou, "Leveraging SDN for The 5g Networks: Trends, Prospects and Challenges," *arXiv:1506.02876 [cs]*, June 2015. arXiv: 1506.02876. 65

[132] E. Gelenbe, "A Software Defined Self-Aware Network: The Cognitive Packet Network," in *2014 IEEE 3rd Symposium on Network Cloud Computing and Applications (NCCA)*, pp. 9–14, Feb. 2014. 65

[133] Y. Wang, H. Chen, X. Wu, and L. Shu, "An energy-efficient SDN based sleep scheduling algorithm for WSNs," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 59, pp. 39–45, Jan. 2016. 66

[134] J. Wang, X. Chen, C. Phillips, and Y. Yan, "Energy efficiency with QoS control in dynamic optical networks with SDN enabled integrated control plane," *Computer Networks*, vol. 78, pp. 57–67, Feb. 2015. 75

[135] A. Akhtar, X. Wang, and L. Hanzo, "Synergistic spectrum sharing in 5g HetNets: A harmonized SDN-enabled approach," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, pp. 40–47, Jan. 2016. 76

[136] H. Zhang and J. C. Hou, "Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks," *Ad Hoc \& Sensor Wireless Networks*, vol. 1, no. 1-2, pp. 89–124, 2005. 83

[137] D. Katsaros, N. Dimokas, and L. Tassiulas, "Social network analysis concepts in the design of wireless Ad Hoc network protocols," *IEEE Network*, vol. 24, pp. 23–29, Nov. 2010. 88

[138] E. M. Daly and M. Haahr, "Social Network Analysis for Routing in Disconnected Delay-tolerant MANETs," in *Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, MobiHoc '07, (New York, NY, USA), pp. 32–40, ACM, 2007. 90

[139] J. Wu, *Handbook on Theoretical and Algorithmic Aspects of Sensor, Ad Hoc Wireless, and Peer-to-Peer Networks*. CRC Press, Aug. 2005. Google-Books-ID: zF96AgAAQBAJ. 107

[140] A. Mahmud and R. Rahmani, "Exploitation of OpenFlow in wireless sensor networks," in *2011 International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*, vol. 1, pp. 594–600, Dec. 2011. 107

[141] P. Hongyu, W. Weidong, W. Chaowei, C. Gang, and Z. Yinghai, "QoS-guaranteed energy saving routing strategy using SDN central control for backbone networks," *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, vol. 22, pp. 92–100, Oct. 2015. 108

[142] S. Li, L. D. Xu, and X. Wang, "Compressed Sensing Signal and Data Acquisition in Wireless Sensor Networks and Internet of Things," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, pp. 2177–2186, Nov. 2013. 108

[143] W. Wang, Y. Chen, Q. Zhang, and T. Jiang, "A software-defined wireless networking enabled spectrum management architecture," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, pp. 33–39, Jan. 2016. 116

[144] S. Zhou, T. Zhao, Z. Niu, and S. Zhou, "Software-defined hyper-cellular architecture for green and elastic wireless access," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, pp. 12–19, Jan. 2016. 117

[145] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, pp. 102–114, Aug. 2002. 129

[146] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies, "A survey of mobility models for ad hoc network research," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2, pp. 483–502, Aug. 2002. 134

[147] E. Casilari, J. M. Cano-García, and G. Campos-Garrido, "Modeling of current consumption in 802.15.4/ZigBee sensor motes," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 10, no. 6, pp. 5443–5468, 2010. 143

[148] J. Aparicio, J. Legarda, J. Larranaga, and J. J. Echevarria, "Cross-over-net: An energy-aware coordination algorithm for WANETs based on software-defined networking," in *2015 23rd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, pp. 37–41, Sept. 2015. 146

Declaration

I herewith declare that I have produced this work without the prohibited assistance of third parties and without making use of aids other than those specified; notions taken over directly or indirectly from other sources have been identified as such. This work has not previously been presented in identical or similar form to any examination board.

The dissertation work was conducted from 2013 to 2018 under the supervision of Dr. Jon Legarda at the University of Deusto.

Bilbao

Esta Tesis fue finalizada de escribir en Bilbao el 9 de enero de 2018

Está página es dejada en blanco intencionalmente