

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Carrera

**Selección Dinámica de Agregadores de Tráfico en Redes
Capilares**

(Dynamic Selection of Traffic Aggregators in Capillary
Networks)

Para acceder al Título de

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Autor: Edgar Epifanio Delgado

Julio - 2012



INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA

Realizado por: **Edgar Epifanio Delgado**

Director del PFC: **Juan Rico Fernández**

Título: “Selección Dinámica de Agregadores de Tráfico en Redes Capilares”

Title: “Dynamic Selection of Traffic Aggregators in Capillary Networks”

Presentado a examen el día: 24 de Julio de 2012

para acceder al Título de

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): García Gutiérrez, Alberto Eloy

Secretario (Apellidos, Nombre): Agüero Calvo, Ramón

Vocal (Apellidos, Nombre): Allende Recio, Miguel Ángel

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del PFC
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Proyecto Fin de Carrera N°
(a asignar por Secretaría)

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría dar las gracias a mi familia, en especial a mis padres, a mi hermano y a mi hermana; por apoyarme en los momentos difíciles de la carrera, sobre todo en los primeros meses. El éxito en la vida académica no hubiese sido posible de no ser por la educación que he recibido de ellos. También a mi novia, Ainhoa, quién ha tenido que aguantar conversaciones con ciertos tintes friki-tecnológicos.

A TST y al Grupo de Ingeniería Telemática, me brindaron la oportunidad de realizar este proyecto con ellos. Ha sido casi un año entero en el que además de hacer el proyecto he aprendido cosas sobre la vida laboral venidera y también ha habido tiempo para momentos de ocio (algún día tocará la bonoloto, el euromillón o la primitiva; creo que todavía hay que terminar el torneo de pádel). Me gustaría agradecerse en especial a dos personas que me han ayudado y guiado con mis dudas, Juan y Vali. A toda la plantilla de TST, gracias. Gracias también a Ramón, mi tutor y director de proyecto junto con Juan.

No quiero olvidarme tampoco de todos los compañeros de carrera, quiénes han hecho más llevaderas las largas horas de estudio en Ciencias y en el Inter (aunque muchas veces pasásemos más tiempo descansando que estudiando); Jorge (tu iPhone se está quedando viejo, espero que te compres el 5 y no te pases al lado oscuro), Miguel y Eduardo (gemelos indistinguibles los primeros meses de carrera), mucha suerte a los tres el año que viene por tierras turinesas, Dani (¿He oído fiesta en el piso de Dani?), Patri (compañera de varias optativas este último año y de las pocas “telecas”) y Menezo (forocochero por excelencia y devoto de su Ibiza). También quisiera acordarme de María, Espe y Diego, que han hecho agradable la estancia en el colegio mayor.

Han sido 5 años, pero parece que fue ayer cuando empezaba la “uni”. En resumen, muchas gracias a todos por acompañarme en esta etapa de la vida.

Palabras clave

Redes Capilares

Agregación de Tráfico

M2M

IoT

Eficiencia energética

Resumen ejecutivo

Ante la eclosión de las aplicaciones Machine-to-Machine (M2M) y del desarrollo de la Internet de las Cosas (IoT) surgen nuevos retos, relacionados principalmente con el aprovisionamiento de servicio a la gran cantidad de elementos que se necesitarán ser conectados de manera automática a una red de datos (inalámbrica). En este escenario se distinguen dos grandes grupos de dispositivos; por un lado los que se conectan directamente a las redes celulares y, por otro, aquellos que lo hacen a través de un nodo pasarela (gateway). Este trabajo se centra en optimizar el comportamiento de los dispositivos que forman parte del segundo grupo y, más concretamente, en escenarios de redes con una gran cantidad de nodos, lo que se viene denominando red capilar.

El concepto de red capilar emerge de las redes de sensores tradicionales, y se refiere concretamente a aquellas que se caracterizan por tener una población muy alta, una tasa individual de datos muy baja (<1 bps) y la necesidad de usar comunicaciones multisalto para poder alcanzar el punto de salida hacia una red de datos. Este tipo de despliegues son ampliamente utilizados para la monitorización y actuación sobre grandes áreas (bosques, pantanos...); además, teniendo en cuenta que están basadas en tecnologías y conceptos genéricos de redes de sensores, ofrecen un notable margen de mejora en varios aspectos. En particular, este trabajo se centra en la optimización de los procesos de selección de los nodos agregadores de tráfico. Para ello, partiendo de políticas tradicionales de *clustering*, se diseñarán y evaluarán una serie de procedimientos basados en la información de contexto de cada nodo. En base a estas políticas se evaluarán los siguientes parámetros de mérito:

- Impacto de la selección dinámica de agregadores en la vida de la red.
- Impacto del re-cálculo de la topologías de la red sobre el consumo global.
- Estudio del balance energético derivado de la aplicación de las políticas diseñadas.
- Impacto en la vida de la red y en el área sobre la que se realiza la monitorización.

Finalmente, en base a los resultados obtenidos en los estudios realizados, se propondrá un esquema de protocolo *context aware* que podría emplearse para la implementación de las funcionalidades analizadas

Executive Summary

The emerging of M2M applications and the development of the Internet of Things concept new challenges need to be faced. It is mandatory to solve different issues such as service provisioning to the huge amount of devices that it is supposed to be wirelessly connected. In this scenario there are two main groups of devices; on the one hand those which are directly connected with cellular technologies, and on the other hand those using low power low range communication technologies that requires a gateway for reaching the core network. This work focuses on developing and analyzing different techniques that could be applied to this second group forming capillary networks.

Capillary network concept comes from traditional WSN, and it refers to those with a huge amount of device but whose devices do not require many resources neither bandwidth nor complex processing for performing their activities. One of the key aspects is the use of multihop communication for providing connectivity to public network with only one device connected to it. This kind of deployments is widely used for monitoring big areas mainly environmental and industrial applications.

The scope of this work is acting over the procedures running in networks for selecting the different points where traffic could be aggregated so as to reduce overall network load and also reduce power consumption in many points of the network. It has been defined three different policies that have been compared introducing key concepts that will be applied improving overall capillary network performance. The four main aspects that have been considered are:

- Impact of dynamic selection in capillary network life.
- Impact of network topology reconfiguration in terms of resources and energy in the nodes.
- Analysis of energetic balance based on the policy for selecting aggregation point chosen.
- Evaluation of energy saving versus area covered and impact of maximizing one of the parameters.

Finally, the work will provide some key aspects that must be included for creating a real protocol implementing the analysis performed in the simulations.

Índice de contenidos

1	Introducción	1
2	Situación actual de los sistemas M2M	3
2.1	Comunicaciones M2M.....	3
2.1.1	Dispositivos M2M.....	4
2.1.2	Redes capilares.....	5
2.1.3	Redes celulares.....	14
2.2	Organismos de estandarización	20
2.2.1	European Telecommunications Standards Institute (ETSI).....	20
2.2.2	3rd Generation Partnership Project (3GPP).....	23
2.3	Escenarios de aplicación	25
3	Diseño del protocolo	28
3.1	Introducción	28
3.2	Caso de Uso	28
3.3	Problemas detectados.....	29
3.4	Requerimientos y supuestos	30
3.4.1	Protocolo para la jerarquización y descubrimiento de la red: AODV	32
4	Características del simulador desarrollado	36
4.1	Introducción	36
4.2	Configuración del simulador	36
4.3	Módulos creados.....	38
4.3.1	ConfigurationFile.....	39
4.3.2	Node	40
4.3.3	EndDevice.....	41
4.3.4	Gateway	42
4.3.5	Scenario.....	43
4.4	Procedimientos implementados	44
4.4.1	Asignación de rol y posición a cada nodo	46
4.4.2	Funciones de peso.....	46
4.4.3	Definición de la topología de la red	49
4.4.4	Envío de mensajes de datos	52
4.4.5	Reconfiguración.....	53

4.5	Diagrama de bloques del simulador.....	54
5	Resultados	56
5.1	Procedimiento de medida.....	56
5.1.1	Script de PERL.....	56
5.2	Parámetros globales.....	57
5.3	Casos estudiados.....	58
5.3.1	Evaluación del impacto del número máximo de saltos permitidos en la red	59
5.3.2	Evaluación del proceso de selección de agregador	68
6	Conclusiones y Líneas Futuras.....	89
6.1	Conclusiones.....	89
6.2	Líneas Futuras	90

Índice de figuras

Figura 2.1 – Escenario típico de aplicación de las comunicaciones M2M	3
Figura 2.2 - TSgate y TSmart.....	5
Figura 2.3 - Topologías de red en ZigBee y roles	9
Figura 2.4 – Pila de protocolos de ZigBee.....	9
Figura 2.5 – Ejemplo de aplicación del perfil HDP [11].....	11
Figura 2.6 – Arquitectura de WirelessHART [13].....	13
Figura 2.7 – Asignación de frecuencias en una red celular.....	14
Figura 2.8 – Arquitectura general de una red celular.....	15
Figura 2.9 – Comparativa de velocidades entre diferentes tecnologías celulares [15].	15
Figura 2.10 – Comparativa entre diferentes tecnologías inalámbricas [16].	16
Figura 2.11 – Arquitectura LTE	20
Figura 2.12 – Escenario Smart Metering [26].....	27
Figura 3.1 – Despliegue típico	29
Figura 3.2 – Comparación entre estrategias para la selección del gateway	30
Figura 3.3 – Descubrimiento de vecinos mediante mensajes Hello.....	32
Figura 3.4 - Formato del mensaje RREQ.....	33
Figura 3.5 - Formato del mensaje RREP.	33
Figura 3.6 – Descubrimiento de rutas entre el nodo 1 y el nodo 4	33
Figura 4.1 – Despliegue aleatorio y despliegue uniforme	38
Figura 4.2 – Relación entre clases del simulador.....	39
Figura 4.3 – Declaración de la clase escenario.....	44
Figura 4.4 – Diagrama de bloques de los procedimientos implementados.....	45
Figura 4.5 – Ecuación de la función de peso lineal	47
Figura 4.6 – Primera función de peso	48
Figura 4.7 – Topología de la red	50
Figura 4.8 - Diagrama de flujo del descubrimiento de rutas	51
Figura 4.9 – Intercambio de mensajes RREQ y RREP.....	52
Figura 4.10 – Nodos aislados debido al agotamiento de la batería	54
Figura 4.11 – Diagrama de bloques del simulador.....	55
Figura 5.1 – Diagrama de bloques del proceso de simulación	57
Figura 5.2 – Número de mensajes de datos enviados en función del número de saltos. Función de peso aleatoria	60
Figura 5.3 - Número de mensajes de datos enviados en función del número de saltos. Función de peso lineal.....	61
Figura 5.4 - Número de mensajes de datos enviados en función del número de saltos. Segunda función de peso	62
Figura 5.5 - Comparación del mapa de temperaturas para MH=1 y MH=3 con selección uniforme de gateways. Función de peso aleatoria	63
Figura 5.6 – Comparación del mapa de temperaturas para MH=1 y MH=3 con selección uniforme de gateways. Función de peso lineal.....	63
Figura 5.7 - Comparación del mapa de temperaturas para MH=1 y MH=3 con selección uniforme de gateways. Segunda función de peso	64
Figura 5.8 - Comparación del mapa de temperaturas para MH=5 y MH=7 con selección uniforme de gateways. Función de peso aleatoria	64
Figura 5.9 - Comparación del mapa de temperaturas para MH=5 y MH=7 con selección uniforme de gateways. Función de peso lineal.....	65

<i>Figura 5.10 - Comparación del mapa de temperaturas para MH=5 y MH=7 con selección uniforme de gateways. Segunda función de peso</i>	<i>65</i>
<i>Figura 5.11 – Número de nodos sin batería en función del número de mensajes enviados. Función de peso aleatoria.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5.12 - Número de nodos sin batería en función del número de mensajes enviados. Función de peso lineal.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5.13 - Número de nodos sin batería en función del número de mensajes enviados. Segunda función de peso.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.14 –Nodos fuera de la red pero con batería para despliegue uniforme.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5.15 – Mapa de temperatura para MH=1 y con selección aleatoria de gateways. Función de peso aleatoria</i>	<i>69</i>
<i>Figura 5.16 - Mapa de temperatura para MH=1 y con selección aleatoria de gateways. Función de peso lineal.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.17 - Mapa de temperatura para MH=1 y con selección aleatoria de gateways. Segunda función de peso</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.18 - Mapa de temperatura para MH=3 y con selección aleatoria de gateways. Función de peso aleatoria.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.19 - Mapa de temperatura para MH=3 y con selección aleatoria de gateways. Función de peso lineal.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5.20 - Mapa de temperatura para MH=3 y con selección aleatoria de gateways. Segunda función de peso</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5.21 - Mapa de temperatura para MH=5 y con selección aleatoria de gateways. Función de peso aleatoria.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.22 - Mapa de temperatura para MH=5 y con selección aleatoria de gateways. Función de peso lineal.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.23 - Mapa de temperatura para MH=5 y con selección aleatoria de gateways. Segunda función de peso</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.24 - Mapa de temperatura para MH=7 y con selección aleatoria de gateways. Función de peso aleatoria.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 5.25 - Mapa de temperatura para MH=7 y con selección aleatoria de gateways. Función de peso lineal.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5.26 - Mapa de temperatura para MH=7 y con selección aleatoria de gateways. Segunda función de peso</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5.27 – Nodos aislados para un despliegue uniforme y una selección óptima de gateways.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.28 – Nodos aislados para un despliegue uniforme y una selección aleatoria de gateways.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.29 – Nodos aislados para un despliegue aleatorio y una selección uniforme de los gateways ...</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5.30 – Nodos aislados para un despliegue aleatorio y una selección aleatoria de los gateways....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5.31 – Número de nodos sin batería frente a mensajes enviados. Despliegue aleatorio, selección uniforme. Función de peso aleatoria</i>	<i>80</i>
<i>Figura 5.32 - Número de nodos sin batería frente a mensajes enviados. Despliegue aleatorio, selección uniforme. Función de peso lineal.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 5.33 - Número de nodos sin batería frente a mensajes enviados. Despliegue aleatorio, selección uniforme. Segunda función de peso</i>	<i>81</i>
<i>Figura 5.34 – Número de mensajes de datos enviados en función del umbral. Función de peso aleatoria.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5.35 - Número de mensajes de datos enviados en función del umbral. Función de peso lineal.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5.36 - Número de mensajes de datos enviados en función del umbral. Segunda función de peso</i>	<i>84</i>
<i>Figura 5.37 – Número de nodos fuera de la red pero con batería/reconfiguración. Función de peso aleatoria</i>	<i>85</i>
<i>Figura 5.38 - Número de nodos fuera de la red pero con batería/reconfiguración. Función de peso lineal</i>	<i>85</i>

<i>Figura 5.39 - Número de nodos fuera de la red pero con batería/reconfiguración. Segunda función de peso</i>	<i>86</i>
<i>Figura 5.40 – Número de nodos sin batería frente a número de mensajes enviados. Función de peso aleatoria</i>	<i>87</i>
<i>Figura 5.41 - Número de nodos sin batería frente a número de mensajes enviados. Función de peso lineal</i>	<i>87</i>
<i>Figura 5.42 - Número de nodos sin batería frente a número de mensajes enviados. Segunda función de peso</i>	<i>88</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 2.1 – Comparativa entre diferentes tecnologías para la red capilar [12].</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 2.2 – Tabla comparativa entre las tecnologías GPRS/UMTS/LTE</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 2.3 – Ejemplos de aplicaciones M2M de la ETSI</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 2.4 - Ejemplos de aplicaciones M2M del 3GPP</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 2.5 – Características de los escenarios de aplicación</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 3.1 - Lista de requerimientos</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 3.2 - Lista de supuestos.</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 3.3 – Tabla de rutas después del intercambio de mensajes Hello</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 3.4 - Tabla de rutas tras los mensajes RREQ y RREP.</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 4.1 - Mapeo de entidades con su clase correspondiente</i>	<i>38</i>

1 Introducción

Los avances en las telecomunicaciones han ido marcando la evolución de los patrones de funcionamiento tanto de las relaciones humanas como en las aplicaciones empresariales. Las ventajas que han sido históricamente introducidas por las tecnologías más novedosas han ayudado al desarrollo de nuevos patrones de funcionamiento para todo el rango de aplicaciones industriales, así como para la variación del modo en que los humanos nos comunicamos. La evolución en estas comunicaciones, desde los telegramas hasta los más modernos sistemas de mensajería instantánea pasando por las llamadas de voz, ha existido una enorme variedad de tecnologías que han ido satisfaciendo las necesidades de las personas. En el mundo industrial esa evolución se ha visto reflejada de una manera similar, desde sencillos sistemas basados en alarmas, hasta las más modernas aplicaciones de gestión remota e inteligencia artificial existe una gran cantidad de opciones desarrolladas que han favorecido la competitividad y facilitado la tarea de las personas.

Esta modificación de los patrones de comunicación junto con el abaratamiento de la tecnología ha hecho emerger un nuevo paradigma de comunicación en el que la interacción con los humanos no es necesaria. A este nuevo modelo se lo conoce como comunicaciones Máquina a Máquina (M2M) y cubren una gran cantidad de aplicaciones, desde sencillos mecanismos de telemedida hasta la gestión automática de sistemas de transporte. Cada una de las potenciales aplicaciones del sistema presenta requerimientos y necesidades diferentes, es por ello que el trabajo en los últimos tiempos tanto en estandarización de un caso global, como la optimización de los sistemas de alto rendimiento actuales a las aplicaciones de muy bajos requerimientos han adquirido una gran relevancia. El trabajo que se presenta a continuación se enmarca dentro de este último grupo de actividades.

A lo largo de este trabajo se presentará un simulador propietario que evaluará las prestaciones de diferentes opciones para la optimización del consumo energético en lo que se conoce como redes capilares. Las redes capilares se caracterizan por estar compuestas por una gran cantidad de nodos y tener muy bajos requerimientos de tasa de datos, es por ello que las nuevas tecnologías como LTE no pueden ser aplicadas como están definidas en su estándar en la actualidad a pesar de las considerables ventajas que introduce. Las modificaciones son requeridas en muchas de sus capas para poder considerar esa tecnología como potencial para su uso en las comunicaciones M2M con bajas tasas de datos.

Uno de los principales proyectos que están enfrentando este problema es EXALTED, en él se están sentando las bases de una modificación de LTE conocida como LTE-M donde propuestas como la desarrollada en este proyecto tendrán cabida. Esta optimización de la tecnología para poder soportar los requerimientos de las aplicaciones previamente mencionadas dará cabida a una gran cantidad de dispositivos y contribuirá a la universalización de este tipo de sistemas. Dentro del marco de dicho proyecto este trabajo ha suscitado el interés de entidades como el CTTC y la Universidad de Surrey, con quienes se han mantenido diferentes conversaciones que se verán reflejadas en la redacción de un artículo científico conjunto. Además, en el momento de entrega de esta memoria se está procediendo con la elaboración de un artículo que será enviado a una conferencia internacional (*International Workshop on M2M Communication Technologies & Systems, Wuxi/China - 24 Octubre 2012*)

Esta memoria ha sido dividida en 6 secciones; se comenzará desarrollando el entorno en el que se desarrolla este trabajo, resumiendo las principales características del estado del arte tanto de tecnologías como de aplicaciones; seguidamente se describen las principales características del protocolo desarrollado y que sustentará los resultados del estudio; a continuación, en la sección 4 se presenta en detalle las particularidades del simulador de red propietario desarrollado para la validación de los conceptos presentados en este trabajo. Finalmente, en las dos últimas secciones se describirán las conclusiones que se extraen de este trabajo y las líneas abiertas para futuras investigaciones que deja este proyecto.

2 Situación actual de los sistemas M2M

2.1 Comunicaciones M2M

En los últimos tiempos los avances en dispositivos y tecnologías de comunicación han hecho emerger nuevos paradigmas de comunicación. Estos nuevos modelos se alejan de las aplicaciones tradicionales centradas en la interacción entre dos personas evolucionando hacia la generación de sistemas cada vez más autónomos y autosuficientes. Este tipo de sistemas se comunican empleando los principios de lo que ha sido llamado Comunicaciones Machine-to-Machine (M2M).

Dentro de este proyecto se estudian métodos para optimizar el funcionamiento y la vida de los dispositivos que se basan en este tipo de principios y que por sus características están limitados en recursos. El escenario de aplicación típico que se ha considerado es el que se muestra en la siguiente figura (Figura 2.1).

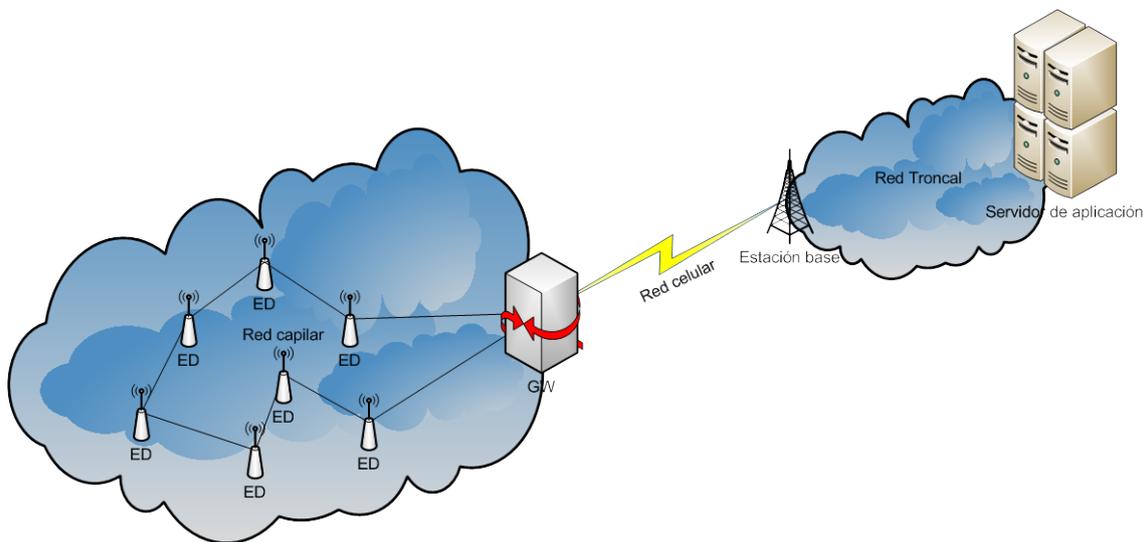


Figura 2.1 – Escenario típico de aplicación de las comunicaciones M2M

Los elementos principales que intervienen en estos escenarios son:

- Dispositivo sensor/actuador, fuente de la información que emplea la aplicación en el caso de los sensores, o dispositivo remoto que ejecutan órdenes enviadas desde un servidor para los actuadores.
- Red capilar, conjunto de dispositivos de baja potencia y baja capacidad que se interconectan accediendo a la red troncal a través de un único punto llamado *Gateway*.
- Red de acceso, en las aplicaciones que han sido contempladas en este proyecto se consideran todas las tecnologías inalámbricas celulares.
- Servidor de aplicaciones, destino de los datos recogidos por los sensores y origen de los comandos enviados a los actuadores. Estos servidores están directamente conectados a la red con lo que la comunicación entre dispositivos y el servidor es ejecutada empleando los protocolos de comunicación estándar existentes en la actualidad.

En las siguientes subsecciones se presenta el estado del arte en las tecnologías cubiertas y involucradas en el desarrollo de este trabajo.

2.1.1 Dispositivos M2M

En una red M2M tenemos dispositivos que se encargan de recopilar datos y enviarlos al servidor de aplicación a través de una arquitectura multisalto. Existen dos tipos principales de dispositivos M2M, los *Dispositivos Finales* y los *Gateways*, cada uno con unas funciones específicas que se verán a continuación.

Tienen en común características como su bajo consumo, debido a su corto alcance, y su sencillez de despliegue.

2.1.1.1 Dispositivos Finales

Dispositivo M2M que se encarga de evaluar un parámetro físico según una periodicidad prefijada que puede ser modificable, o bien de la ejecución de acciones en base a los sistemas conectados a él. Se trata de dispositivos sencillos que poseen una interfaz radio de baja potencia para comunicarse con otros dispositivos y de esa manera conseguir hacer llegar su información hasta su destino final, o bien un método de acceso directo a la red pública. Este tipo de dispositivos son la base de lo que se denomina red capilar que posteriormente será explicado.

2.1.1.2 Gateway

Dispositivo M2M de similar complejidad a la de los dispositivos finales pero que se caracteriza por la posesión de dos interfaces de comunicación. Por una parte implementan un interfaz de baja potencia para comunicarse con los dispositivos finales incluidos en la red capilar. Además al ser el punto de enlace de éstos con la red pública implementa otro interfaz de comunicación que permite redirigir el tráfico interno de la red capilar hacia el exterior. Para el tipo de aplicaciones que serán exportados los resultados de este proyecto el tipo de conexión de datos con la red pública se realizará mediante el empleo de alguna de las tecnologías explicadas en la sección 2.1.3.3.

2.1.1.3 Plataforma TSmarT

Muchos de los parámetros que se emplean en el desarrollo de este proyecto han sido obtenidos de las características de la plataforma *TSmarT* de TST [1]. Esta plataforma está compuesta por dos dispositivos focalizados para el uso en aplicaciones M2M, un dispositivo final *TSmoTe* y un gateway *TSgaTe*.

La plataforma *TSmarT* permite desarrollar aplicaciones inalámbricas M2M, de monitorización y control remoto de forma rápida y sencilla.

TSmarT es una plataforma modular de comunicaciones inalámbricas dirigida a la rápida implementación de aplicaciones de monitorización y control remoto en diversos sectores. *TSmarT* se compone de dos tipos de dispositivos: los módulos *TSmoTe* y los equipos *TSgaTe*. Dotados de procesadores 32 bit de bajo coste y altas prestaciones y equipados de un Sistema Operativo de Tiempo Real, ambos módulos implementan infinidad de puertos de comunicaciones y entradas/salidas programables, así como interfaces de comunicaciones inalámbricas y sensorica básica.

Los equipos *TSgaTe* (Gateway) constan de puertos e interfaces de comunicaciones adicionales, por lo que son la solución óptima para ejercer de concentradores, mientras que los *TSmoTe* (Dispositivo Final) constan de múltiples interfaces para conectar sensores y actuadores, y han sido optimizados para despliegues a gran escala.

Se muestra a continuación una imagen de ambos dispositivos (Figura 2.2).



Figura 2.2 - TSgate y TSmarT

2.1.2 Redes capilares

Las redes capilares son aquellas formadas por un conjunto grande de dispositivos de baja capacidad con baja tasa de datos y que poseen de un único punto de salida hacia la red troncal. Las redes capilares presentan las características típicas de las redes ad-hoc.

2.1.2.1 Redes Mobile Ad-hoc Network (MANET)

Las redes MANET son redes de dispositivos móviles conectados por alguna tecnología inalámbrica y que poseen propiedades de auto-configuración, además de tener cierta movilidad.

Las redes MANET son redes ad-hoc por lo tanto no tienen una arquitectura centralizada. Cada dispositivo MANET se puede mover en cualquier dirección, esto hace que los enlaces con otros dispositivos cambien constantemente, pero debido a que son auto-configurables las rutas se actualizan automáticamente.

Cada dispositivo debe transmitir toda la información relativa a otros, por lo tanto cada dispositivo hace la función de router. Este tipo de redes pueden estar conectadas a otras redes más grandes como por ejemplo Internet.

El gran crecimiento que se ha producido en dispositivos inalámbricos a lo largo de las dos últimas décadas ha hecho que las redes MANET sean objeto de investigación, se han estudiado diferentes protocolos de enrutamiento y se han comparado en base a la pérdida de paquetes, el *overhead* introducido por el protocolo, el *delay* total, la tasa bruta de datos.

Podemos distinguir entre los siguientes tipos de redes MANET:

- Vehicular Ad-hoc Networks (VANETs): Se usan para la comunicación entre vehículos y entre vehículos y dispositivos colocados a lo largo de la carretera.

- Intelligent Vehicular Ad-hoc Networks (InVANETs): Permiten que los vehículos se comporten de manera inteligente ante colisiones, accidentes, etc.
- Internet Based Ad-hoc Mobile Networks (iMANETs): son redes Ad-hoc que enlazan móviles con gateways de Internet.

Las redes MANET se pueden usar en redes de sensores, por ejemplo para medir la contaminación del aire en una determinada zona. Pero hay que tener en cuenta que sensores próximos medirán valores similares, esta redundancia en los datos debido a la proximidad espacial hace que se necesiten protocolos que midan la correlación espacial entre los nodos de la red y así realizar la agregación de tráfico de manera más eficiente.

2.1.2.1.1 Protocolos de enrutamiento

Existen tres grandes grupos de protocolos de enrutamiento en redes Ad-hoc en función de cómo gestionan la caída de un enlace. Tenemos protocolos reactivos, proactivos e híbridos.

- Protocolos reactivos. Este tipo de protocolos de comunicaciones modifican las rutas que se establecen para las conexiones entre nodos una vez detectan el fallo de una existente. Esto es, cuando un nodo intenta enviar un paquete a otro que ha modificado su ubicación y no es capaz de llegar a él, dispara un proceso de búsqueda de rutas para fijar un nuevo método de conexión con el nodo existente. Los principales protocolos reactivos son DSR (Dynamic Source Routing) [2] y AODV (Adhoc OnDemand Distance-Vector) [3].
- Protocolos proactivos. Por el contrario, mantienen actualizadas sus tablas de rutas de manera que detectan la caída de enlaces sin necesidad de que se envíe tráfico de datos por ellos. Los problemas que presentan este tipo de protocolos son el excesivo uso de recursos de la red que emplean, lo que se traduce en una pérdida de rendimiento así como en un mayor consumo energético en los nodos. Los protocolos proactivos más empleados son DSDV (Destination Sequenced Distance Vector) [4] y OLSR (Optimized Link-State Routing) [5].
- Protocolos híbridos. Generalmente utilizado para protocolos no uniformes. Incluye ambos procedimientos anteriores en distintos niveles del encaminamiento. Se consigue reducir la sobrecarga de la red con mensajes de control presentada por los protocolos activos, mientras que se disminuye la latencia de las operaciones de búsqueda mostrada entre los reactivos. Dentro de estos protocolos destaca el TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm) [6].

2.1.2.2 Tecnologías empleadas

2.1.2.2.1 IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 [7] define la capa física y la capa MAC de OSI en LR-WPAN (Low Rate Wireless Personal Area Networks).

El propósito del estándar es definir los niveles de red básicos para dar servicio a un tipo específico de red inalámbrica de área personal (WPAN) centrada en la habilitación de comunicación entre dispositivos ubicuos con bajo coste y velocidad (en contraste con esfuerzos más orientados directamente a los usuarios medios, como Wi-Fi). Se enfatiza el bajo

coste de comunicación con nodos cercanos y sin infraestructura o con muy poca, para favorecer aún más el bajo consumo.

En su forma básica se concibe un área de comunicación de 10 metros con una tasa de transferencia de 250 kbps. Se pueden realizar compromisos que favorezcan aproximaciones más radicales a los sistemas embebidos con requerimientos de consumo aún menores. Para ello se definen no uno, sino varios niveles físicos. Se definieron inicialmente tasas alternativas de 20 y 40 kbps; la versión actual añade una tasa adicional de 100 kbps. Se pueden lograr tasas aún menores con la consiguiente reducción de consumo de energía. Como se ha indicado, la característica fundamental de 802.15.4 entre las WPAN's es la obtención de costes de fabricación excepcionalmente bajos por medio de la sencillez tecnológica, sin perjuicio de la generalidad o la adaptabilidad.

Entre los aspectos más importantes se encuentra la adecuación de su uso para tiempo real por medio de slots de tiempo garantizados, evitación de colisiones por CSMA/CA y soporte integrado a las comunicaciones seguras. También se incluyen funciones de control del consumo de energía como calidad del enlace y detección de energía.

Un dispositivo que implementa el 802.15.4 puede transmitir en una de tres posibles bandas de frecuencia:

- 868-868,8 MHz: Europa, permite un canal de comunicación (versión de 2003), extendido a tres en la revisión de 2006.
- 902-928 MHz: Norte América, hasta diez canales (2003) extendidos a treinta (2006).
- 2400-2483,5 MHz: uso en todo el mundo, hasta dieciséis canales (2003, 2006).

El estándar define dos tipos de nodo en la red. El primero es el dispositivo de funcionalidad completa (full-function device, FFD). Puede funcionar como coordinador de una red de área personal (PAN) o como un nodo normal. Implementa un modelo general de comunicación que le permite establecer un intercambio con cualquier otro dispositivo. Puede, además, encaminar mensajes, en cuyo caso se le denomina coordinador (coordinador de la PAN si es el responsable de toda la red y no sólo de su entorno).

Contrapuestos a éstos están los dispositivos de funcionalidad reducida (reduced-function device, RFD). Se plantean como dispositivos muy sencillos con recursos y necesidades de comunicación muy limitadas. Por ello, sólo pueden comunicarse con FFD's y nunca pueden ser coordinadores.

2.1.2.2.2 IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks (6LoWPAN)

6LoWPAN [8] es el nombre de un grupo de trabajo del IETF que trabaja en el área de Internet. El grupo 6LoWPAN ha especificado mecanismos de encapsulación y compresión de la cabecera de IPv6 que hacen que sea posible enviar y recibir este tipo de paquetes en redes basadas en el estándar IEEE 802.15.4. Este tipo de redes está caracterizada por tener una capacidad limitada en cuanto a procesado, memoria, energía, rango de alcance y tasa de datos. La principal especificación del 6LoWPAN es la RFC 4944. Este grupo es de interés para este proyecto ya que su objetivo es comprimir la cabecera de IPv6 y así aumentar la tasa bruta reduciendo el overhead.

2.1.2.2.3 ZigBee

ZigBee [9] un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica diseñado por la ZigBee Alliance para aplicaciones de bajo consumo, aquellas en las que la tasa de datos es baja y queremos maximizar la vida útil de las baterías. Está basado en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal, WPAN (Wireless Personal Area Network).

La primera especificación de ZigBee se aprobó el 14 de Diciembre de 2004, usa la banda ISM para usos industriales, científicos y médicos, 868 MHz en Europa, 915 MHz en Estados Unidos y 2,4 GHz en el resto del mundo. Permite comunicación unicast, broadcast y multicast en redes ad-hoc. Atendiendo a los tres tipos de comunicación ZigBee define tres topologías de red:

- **Mallada:** Cada nodo puede llegar al destino a través de cualquiera de sus vecinos. Los nodos usan una versión simplificada del AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector) para formar sus tablas de rutas.
- **En árbol:** Los paquetes se distribuyen hacia arriba o hacia debajo del árbol hasta que alcanzan su destino. Este tipo de topología requiere que los nodos estén activos todo el tiempo, ya que la caída de un enlace supone el re cálculo de todas las rutas.
- **En estrella:** Hay un nodo coordinador que tiene a distancia de un salto a todos los demás nodos. Los nodos que quieren comunicarse entre ellos lo hacen a través del coordinador.

Existen por lo tanto tres roles para los nodos dentro de una red ZigBee, coordinador (es el núcleo de la red, distribuye información hacia otras redes), router (encamina los paquetes a otros nodos) y dispositivos finales (sólo se comunican con sus vecinos). En la Figura 2.3 se observan las tres topologías mencionadas y los roles de cada nodo.

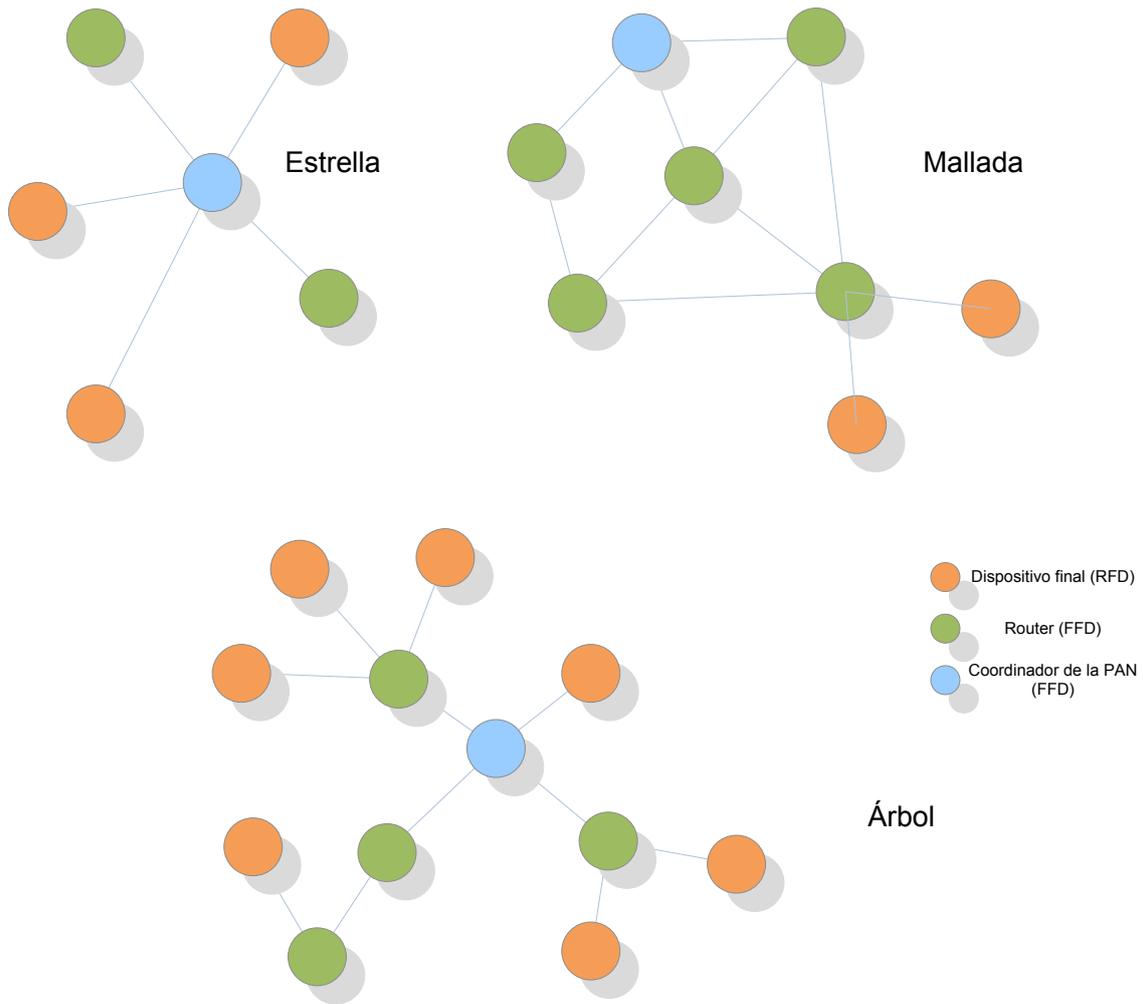


Figura 2.3 - Topologías de red en ZigBee y roles

El IEEE 802.15.4 define la capa física y MAC de los niveles OSI, ZigBee define la capa de red sobre estas dos últimas, una capa de aplicación para permitir el acceso a capas inferiores y un servicio de seguridad que actúa a nivel de la capa de red y de aplicación (Figura 2.4).

A nivel de red se usa un direccionamiento con direcciones IEEE, por lo tanto existen problemas para comunicar este tipo de redes con las redes IP tradicionales. Son necesarios mecanismos de traducción de direcciones IP a IEEE y viceversa para posibilitar esta comunicación.

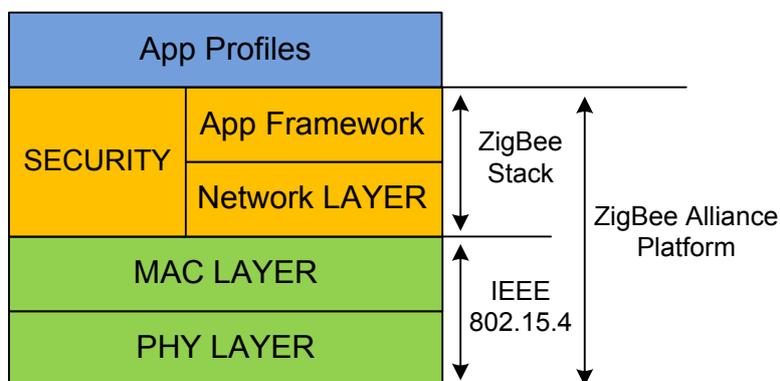


Figura 2.4 – Pila de protocolos de ZigBee.

El control de errores en redes ZigBee se lleva a cabo mediante un *hand shake* para confirmar el envío correcto de los paquetes.

Teniendo en cuenta todas las características de ZigBee, es una buena opción para comunicaciones en redes M2M con limitaciones energéticas y escenarios con topologías malladas con gran densidad de dispositivos. Sin embargo, existen otras características de ZigBee que lo hacen inadecuado.

Una de las desventajas más importantes es la falta de mecanismos para establecer una comunicación E2E (End-to-End) entre diferentes redes capilares. Ni ZigBee ni LTE permiten conectar dispositivos M2M de diferentes redes. La falta de un mecanismo para comunicar dispositivos de diferentes redes capilares, unido a que los dispositivos ZigBee usan direcciones IEEE en vez de direcciones IP, hace inútil la combinación de ZigBee con LTE. Son necesarias por tanto modificaciones en la red LTE (para habilitar las comunicaciones E2E) así como en ZigBee (para realizar la traducción de direcciones IEEE a IP y viceversa).

Además de estas desventajas, existen otras, a saber, seguridad y cobertura. La seguridad es una desventaja desde el punto de vista del alto nivel de complejidad que supone la elección del esquema más apropiado en cada escenario. La cobertura puede ser un problema en redes con baja densidad de dispositivos, ya que las distancias mayores a cientos de metros son inalcanzables para los dispositivos ZigBee.

2.1.2.2.4 Bluetooth

Bluetooth es una tecnología inalámbrica de corto alcance [10] para redes WPAN (Wireless Personal Area Networks) que posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos mediante un enlace por radiofrecuencia en la banda ISM de los 2.4GHz.

La tecnología inalámbrica Bluetooth surge en 1998, y se introduce en el año 2000 en el mundo de las comunicaciones celulares cuando se implementa en un auricular. Hoy en día existen más de 1.5 billones de dispositivos que incorporan la tecnología Bluetooth.

La tecnología Bluetooth de Baja Energía se añadió a la especificación Bluetooth en 2010 y está destinada a sensores con conexión a teléfonos móviles, ordenadores y módulos M2M que actúan como gateways para la conexión a Internet.

Para muchas aplicaciones la combinación de tecnología celular con la tecnología Bluetooth de Baja Energía es la combinación ideal, ya que los chipsets Bluetooth de Baja Energía son baratos de producir (usan la mitad de silicio que los chipsets Bluetooth originales), además permitirán alargar la vida útil de la batería hasta un año (dependiendo de la aplicación).

El perfil de trabajo para los dispositivos de medicina y deportivos, conocido como *Health Device Profile (HDP)* [11], es un perfil que define los requisitos que deben cumplir los dispositivos Bluetooth- Este perfil se usa para conectar dispositivos que miden la presión arterial, la cantidad de glucosa, termómetros, etc con smartphones, portátiles y aparatos sanitarios sin necesidad de cables.

En la Figura 2.5 que se muestra a continuación se puede ver un ejemplo de aplicación de este perfil, en este caso se conecta una báscula mediante Bluetooth a un ordenador para tener un seguimiento del peso del paciente.

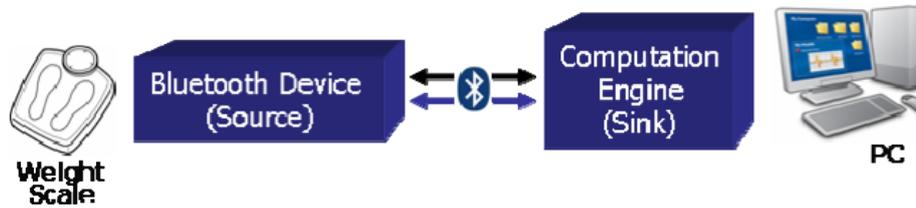


Figura 2.5 – Ejemplo de aplicación del perfil HDP [11].

Para la conexión a los módulos M2M hay que tener en cuenta:

- Disponibilidad global.
- Garantizar la interoperabilidad.
- Bajo coste y consumo.
- Funcionalidad como Gateway incluida.
- Encriptación incluida.
- Desarrollado con una política IP libre y abierta.
- Garantizar robustez para aplicaciones industriales en entornos ruidosos.
- Rango compatible para aplicaciones domésticas (30-60 metros).

2.1.2.2.5 DASH 7

DASH7 [12] es una alianza cuyo objetivo es mejorar y extender el uso de la tecnología basada en la ISO 18000-7. Éste estándar fue creado para estandarizar la tecnología usada por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, proto-DASH7. Es una tecnología inalámbrica de muy bajo consumo (del orden de micro vatios) capaz de incrementar la vida útil de la batería a unos cuantos años, está basada en tecnología RFID (Radio Frequency Identification) activa. Usa la frecuencia libre de 433 MHz disponible en todo el mundo, al usar esta frecuencia nos aseguramos una gran penetración entre paredes y plantas. Esta tecnología soporta tanto comunicaciones tag-to-tag como multisalto, ofreciendo la posibilidad de crear redes malladas.

Además es compatible con IPv6 con lo que la integración en redes de sensores será más fácil. El rango de cobertura varía de unos pocos metros hasta los 2000m dependiendo de la configuración.

Está basado en el concepto BLAST (Bursty, Light-data, Asynchronous, Transitive):

- Bursty: La transferencia de datos no es continua, si no a ráfagas y no incluye vídeo, audio o cualquier tipo de comunicación isócrona.
- Light-data: En la mayoría de las aplicaciones el tamaño del paquete está limitado a 256 bytes. Pueden transmitirse varios paquetes a la vez pero generalmente se evita.
- Asynchronous: La comunicación está basada en comandos-respuestas, no es necesario un mantenimiento de la misma o una sincronización entre dispositivos.

- Transitive: Los dispositivos no necesitan de una infraestructura fija (estaciones base, nodeBs, etc) ya que DASH7 es una arquitectura de subida de datos y no de bajada.

En la Tabla 2.1 podemos ver una comparación con otras tecnologías para redes capilares.

Tabla 2.1 – Comparativa entre diferentes tecnologías para la red capilar [12].

	Low Energy Bluetooth	DASH7 (ISO 18000-7)	Low Power Wi-Fi (IEEE 802.11)	ZigBee (IEEE 802.15.4)
General Specifications				
Frequency Range	2.402-2.482 GHz	433.04 - 434.79 MHz	2.40-2.50 GHz	2.402-2.482 GHz
Discrete Channels	3	1 to 5	3	16
Max Channel Bandwidth	~8 MHz	0.5 to 1.75 MHz	22 MHz	5 MHz
Modulation	GFSK	FSK or GFSK	CCK /QAM64 (b/g)	QPSK
Nominal Data-Rate	1 Mbps	27.8 Kbps	1 Mbps	250 Kbps
Est. Max Potential Data-Rate*	1 Mbps	100 Kbps	54 Mbps	500 Kbps
Nominal Range (0 dBm)	10 m	250 m	25 m	75 m
Standard Related				
Alliance & Standards Bodies	Bluetooth SIG	DASH7 Group, ISO	WiFi Alliance, IEEE	ZigBee Alliance, IEEE
Major Proponents	Sony-Ericsson, CSR, Casio	Savi, US DoD	Cisco, Broadcom	Formerly Philips
Protocol (MAC) Complexity	Low	Low	High	Med to High
RF layer (PHY) Complexity	Low	Low	High	Med
Best-in-breed Solution Power				
Sleep Power	8 µW	4 µW	10 µW	4 µW
Receive (RX) Power	28.5 mW	7.5 mW	90 mW	84 mW
Transmit (TX) Power	26.5 mW	31 mW	350 mW	72 mW
Average Power for ten (10) 256-byte messages per day†	50 µW	42 µW	570 µW	414 µW

El uso de la banda UHF (Ultra High Frequency) hace que DASH7 sea más robusto contra interferencias, al contrario que otras tecnologías como ZigBee, Wi-Fi o Bluetooth que trabajan que en la banda de 2.4 GHz. Esta ventaja hace que la banda UHF sea mejor para este tipo de aplicaciones, a pesar del mayor tamaño de la antena.

2.1.2.2.6 WirelessHART (Highway Adressable Remote Transducer)

HART [13] es un estándar global para enviar y recibir señales digitales entre dispositivos inteligentes y sistemas de control a través de cables analógicos.

WirelessHART es un protocolo de para redes malladas basado en HART, pero con capacidades inalámbricas. Ha sido desarrollado por la HART Communication Foundation como un estándar para redes inalámbricas abierto, en Abril de 2010 se ha convertido en un estándar internacional inalámbrico, llamado IEC 62591 [14].

Las redes inalámbricas HART están compuestas de tres elementos:

- Wireless Field Devices: Son los nodos que realizan el sensado. Pueden ser dispositivos HART inalámbricos o dispositivos HART habilitados para usarlos con WirelessHART.

- Gateways: Se encargan de comunicar los Wireless Field Devices con el cliente a través de red troncal de alta velocidad.
- Network Manager: Es responsable de coordinar, gestionar y configurar la red. Puede ser un nodo o estar incluido dentro del Gateway.

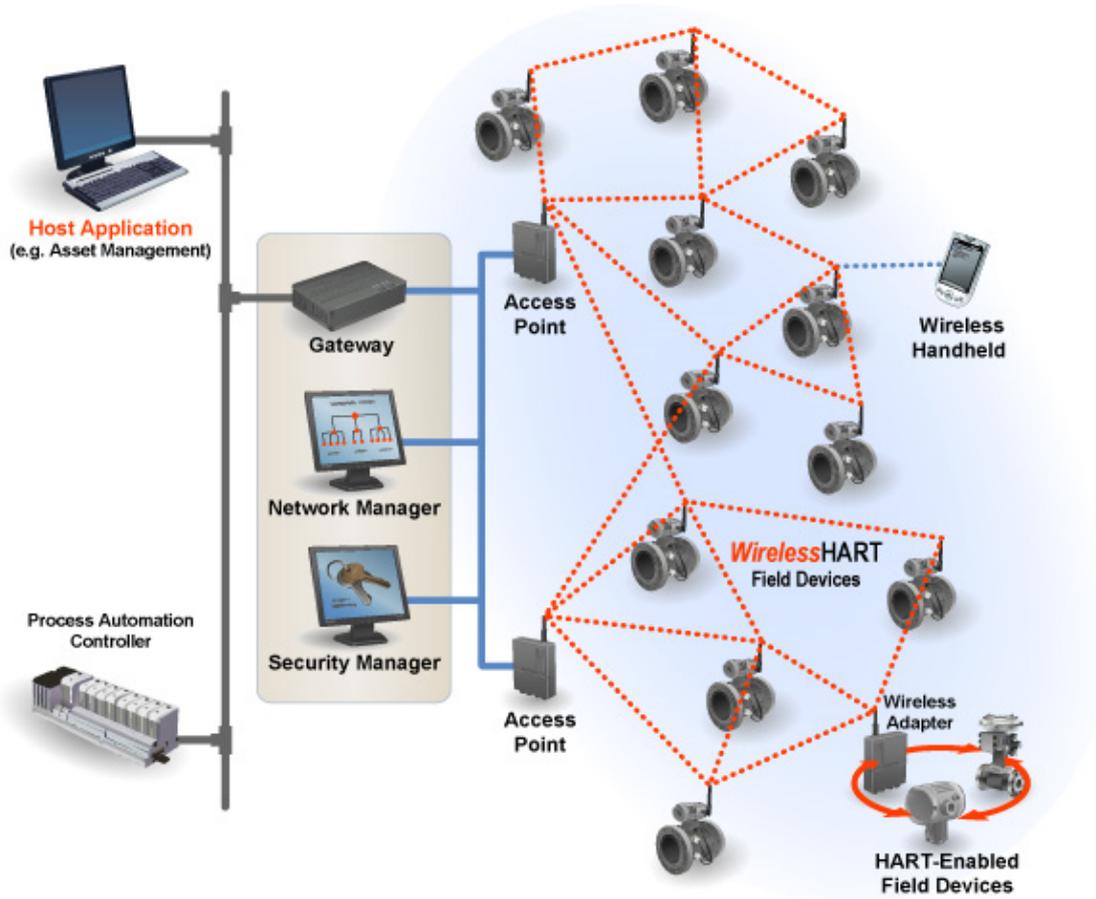


Figura 2.6 – Arquitectura de WirelessHART [13].

El Network Manager tiene información de todas las posibles rutas. Dependiendo de la información que reciba se encarga de modificar las rutas para así asegurar la mínima latencia y la máxima fiabilidad entre los dispositivos WirelessHART y el cliente. Debido a la topología mallada de la red, la movilidad de los nodos o el hecho de añadir un nuevo nodo no supone un problema, ya que si un nodo está dentro del área de cobertura de algún otro pueden comunicarse.

El estándar WirelessHART soporta varios modos de envío de mensajes para satisfacer diversas aplicaciones, incluyendo un modo para notificar excepciones, ad-hoc comando/respuesta y un modo para transferir grandes cantidades de datos. Esto permite que las comunicaciones se adapten a los requisitos de la aplicación, reduciendo así el consumo de energía y aumentando la carga útil.

La red usa el estándar IEEE 802.15.4 en la banda ISM de 2.4 GHz. Los transceptores usan DSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum) y salto en frecuencia para así lograr una comunicación segura y robusta. El protocolo envía una frecuencia u otra, cada una asignada con un valor

lógico, '0' o '1', por lo que se requiere una sincronización precisa, es por esto que wirelessHART usa TDMA para evitar problemas de sincronismo en el receptor.

2.1.3 Redes celulares

2.1.3.1 Introducción

Las redes celulares son redes de comunicación formadas por un conjunto de estaciones base conformando que cubren un espacio físico delimitado, estas zonas cubiertas por cada estación base se conocen como celdas radio. Cada celda opera a una frecuencia determinada y conocida por el gestor de la red de manera que celdas adyacentes no empleen bandas que puedan interferir con sus vecinos.

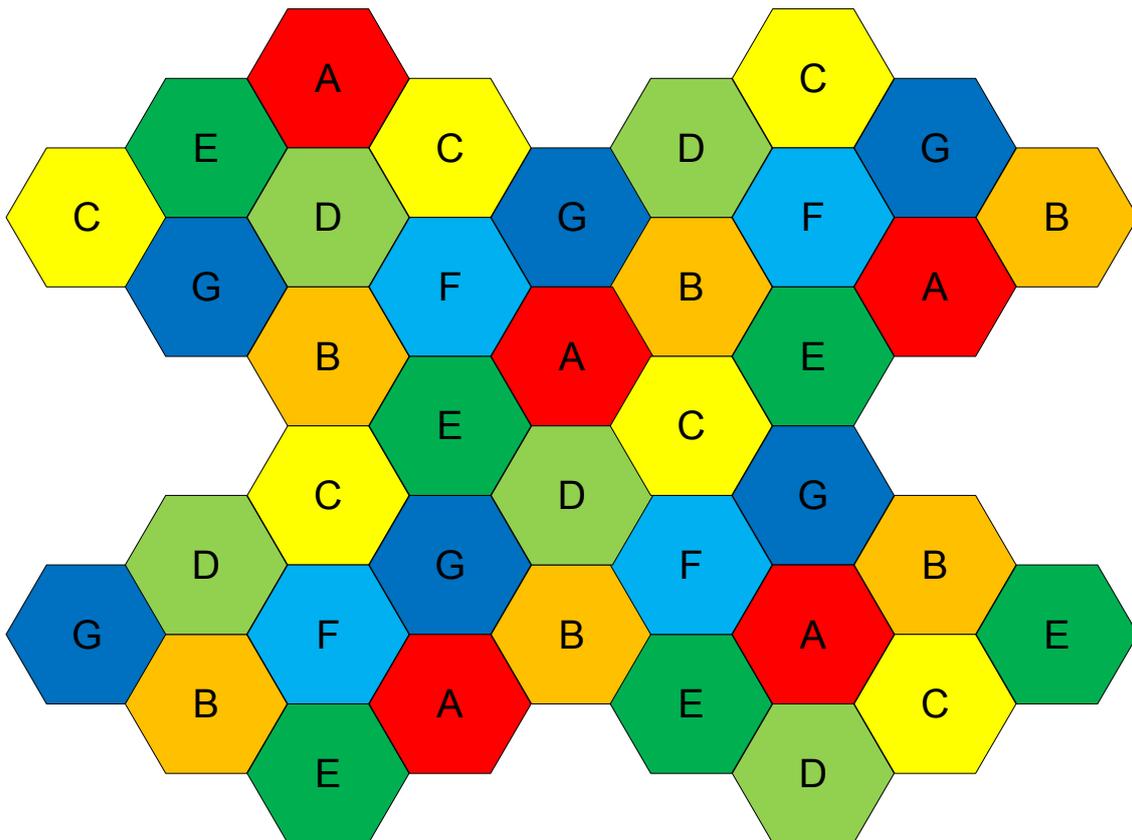


Figura 2.7 – Asignación de frecuencias en una red celular

La Figura 2.7 muestra un ejemplo de despliegue de celdas en el que se ha optado por una teselación hexagonal. Este tipo de teselación es válida debido a que las estaciones base suelen estar compuestas por tres antenas diferentes, cubriendo cada una de ellas 120 grados. Dada las características de propagación radio, el método óptimo de representación de la topología resultante es el mostrado en la figura..

2.1.3.2 Arquitectura

Las redes celulares presentan una arquitectura similar con independencia de la tecnología de acceso radio que se elija. En la Figura 2.8 se muestra la arquitectura de prácticamente cualquier sistema celular, por una parte el acceso de los usuarios a través del interfaz radioeléctrico, y por otra los sistemas y estaciones base pertenecientes a los operadores de la red. En la parte de la red troncal se encuentran diferentes elementos de control, que facilitan

mediante el almacenamiento de la información necesaria, la gestión de todos los aspectos de la red celular, desde la toma de decisiones dentro de una celda, hasta la gestión transparente de la movilidad de los usuarios y dispositivos cuando cambian la estación base con la que están conectados.

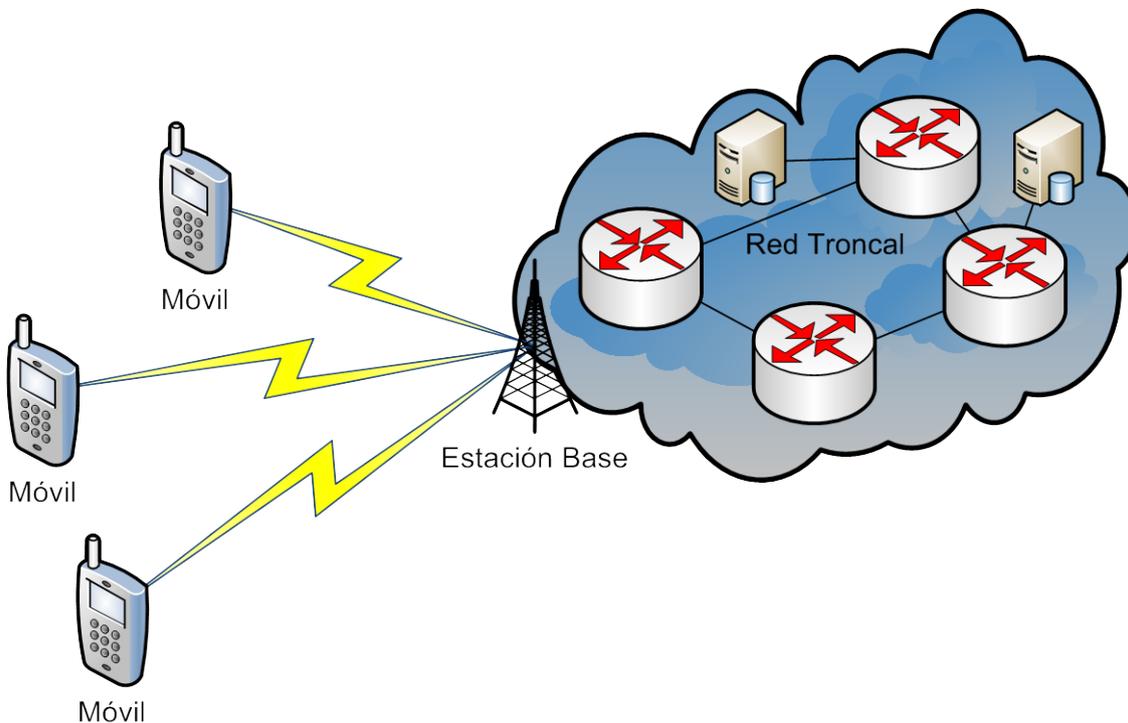


Figura 2.8 – Arquitectura general de una red celular

2.1.3.3 Tecnologías empleadas

Las redes celulares ofrecen una gran variedad de tecnologías con diferentes características de manera que en función de las necesidades de las aplicaciones se pueda elegir la que mejor se adapta a los requerimientos de la misma. Con el paso del tiempo la evolución de la tecnología ha hecho emerger nuevos mecanismos que mejoraban en prestaciones los existentes. En las siguientes figuras (Figura 2.9 y Figura 2.10) se muestran tanto la evolución en velocidad del enlace descendente como el rango de aplicaciones de diferentes tecnologías inalámbricas.

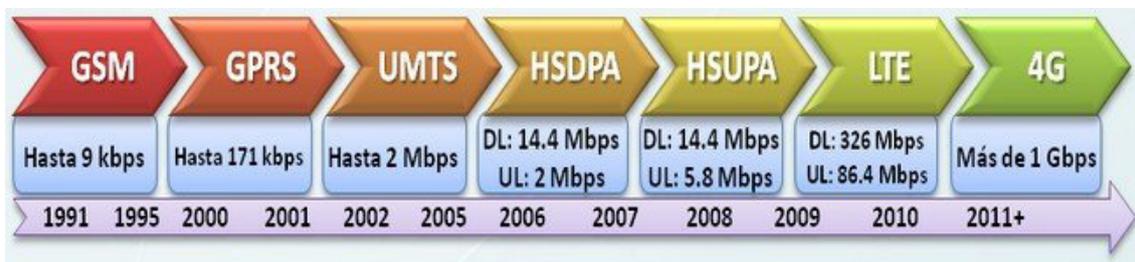


Figura 2.9 – Comparativa de velocidades entre diferentes tecnologías celulares [15].

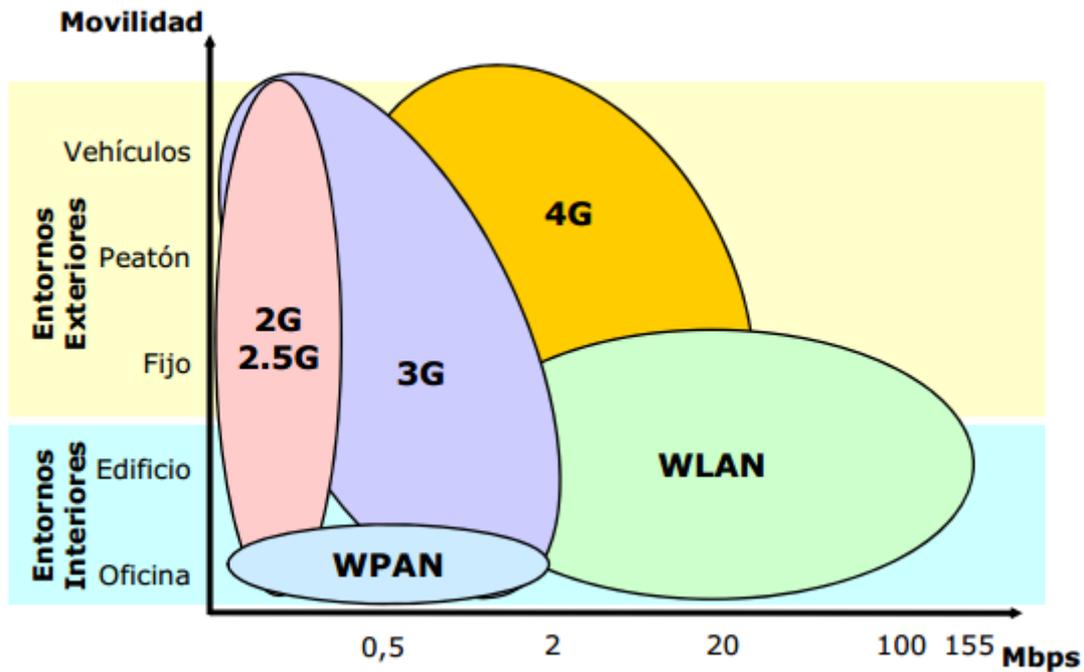


Figura 2.10 – Comparativa entre diferentes tecnologías inalámbricas [16].

La capacidad de las tecnologías actuales cubre todo el espectro de tasas de datos y radio de cobertura posibles para las aplicaciones M2M existentes en la actualidad. Sin embargo, se espera que ante el impacto del paradigma de la Internet de las Cosas y conceptos como las ciudades inteligentes, el número de dispositivos conectados a la red crezca de manera exponencial. Dadas las limitaciones actuales de la tecnología, es necesario el desarrollo de nuevas técnicas que permitan el uso eficiente de los recursos radio de los que se disponen. En resumen, se podría decir que los grandes retos de las comunicaciones M2M en el plano de la red de acceso son:

- Soportar al menos dos órdenes de magnitud más de dispositivos en comparación a las comunicaciones humano-humano.
- Crecer en la diversidad de aplicaciones y servicios.

A continuación se presentan las características más importantes de las diferentes tecnologías celulares existentes (GSM/GPRS y LTE), mencionando brevemente los inconvenientes de cada una de ellas para soportar las futuras aplicaciones y servicios M2M, incluyendo la falta de mecanismos para gestionar un gran número de dispositivos, el overhead requerido para comunicaciones con baja tasa de datos y la dificultad de que sea la red la que inicie la comunicación. Mientras que GSM/GPRS tiene ciertos inconvenientes para satisfacer los requerimientos M2M como se verá más adelante, LTE puede extenderse para soportar las aplicaciones y servicios M2M propuestos.

Además, se presentarán varios candidatos M2M para las redes celulares, con sus ventajas y desventajas. En la siguiente Tabla 2.2 podemos ver las principales características de las diferentes tecnologías celulares.

Tabla 2.2 – Tabla comparativa entre las tecnologías GPRS/UMTS/LTE

Estándar	Modulación	Acceso	Velocidad [Mbps](subida)	Velocidad [Mbps] (bajada)	Rango	Frecuencia
GSM GPRS clase 10	GMSK	TDMA	0.0856	0.0428	26Km	850MHz, 900MHz, 1.8GHz, 1.9GHz
GSM EDGE tipo 2	8-PSK	TDMA	0.4736	0.4736	26Km	850MHz, 900MHz, 1.8GHz, 1.9GHz
GSM EDGE Evolution	16/32 QAM	TDMA	1.8944	0.9472	26Km	850MHz, 900MHz, 1.8GHz, 1.9GHz
UMTS W-CDMA R99	OFDM	CDMA	0.3840	0.3840	29Km	850Mhz, 900MHz, 1.9GHz, 1.9/2.1GHz, 2.1GHz, 1.7/2.1GHz
UMTS W-CDMA HSDPA	OFDM	CDMA	14.4	0.3840	200Km	850Mhz, 900MHz, 1.9GHz, 1.9/2.1GHz, 2.1GHz, 1.7/2.1GHz
UMTS W-CDMA HSUPA	OFDM	CDMA	14.4	5.76	200Km	850Mhz, 900MHz, 1.9GHz, 1.9/2.1GHz, 2.1GHz, 1.7/2.1GHz
UMTS W-CDMA HSPA+	OFDM	CDMA	42	22	200Km	850Mhz, 900MHz, 1.9GHz, 1.9/2.1GHz, 2.1GHz, 1.7/2.1GHz
UMTS TDD	OFDM	CDMA	16	16		450MHz, 850MHz, 1.9GHz, 2GHz, 2.5GHz, 3.5GHz
LTE	OFDM	OFDMA	326.4	86.4		800MHz, 1.8GHz, 2.6GHz

2.1.3.3.1 Global System Telecommunications (GSM) y General Radio Packet Service (GPRS)

GPRS [17] es una extensión de GSM que permite la transmisión de datos en modo paquete. Las velocidades de transferencia van desde 56 a 144 kbps. Fue un estándar del ETSI que surgió en el año 1997 y hoy en día es mantenido por la 3GPP (a partir de la *release* 97). GPRS es un servicio best-effort, por lo tanto con una latencia y una tasa variable que dependen del número de usuarios que estén en ese momento usando el servicio, por lo tanto no asegura una QoS (Quality of Service) como sí lo hacen las tecnologías basadas en circuito conmutado. Usa un esquema de acceso basado en TDMA (Time Division Multiple Access) con FDD (Frequency Division Duplex). Aprovecha la infraestructura de GSM, tan sólo introduce dos nodos, el SGSN (Serving GPRS Support Node) y el GGSN (Gateway GPRS Support Node).

GPRS está diseñado para tráfico a ráfagas, este tipo de tráfico caracteriza a aplicaciones como la navegación web o el acceso al correo electrónico. De acuerdo al estándar GSM [18] [19] [20] se pueden reservar los recursos para GPRS tanto estática como dinámicamente, así como realizar una combinación de ambos.

Como ya se ha mencionado GPRS fue diseñado para tráfico a ráfagas, un tipo de tráfico causado por diversas aplicaciones M2M. Hoy en día casi todos los servicios y aplicaciones M2M están basados en GPRS, debido a las siguientes razones:

- Entrada al mercado M2M inmediata.
- Bajo coste de despliegue.
- Operabilidad internacional y en cualquier lugar.
- Itinerancia entre operadores móviles.
- GPRS es una tecnología probada, también es abierta y está estandarizada.

Los módulos GPRS para aplicaciones M2M evolucionan constantemente y están caracterizados principalmente por su tamaño reducido y su bajo consumo. Actualmente, las aplicaciones y servicios M2M disponibles comercialmente son limitadas, principalmente al campo telemático y de medida, con un pequeño número de dispositivos con poca movilidad (o estáticos).

De acuerdo a Infonetics, en 2009 había 87 millones de dispositivos M2M en el mercado. Cuando hay pocos dispositivos en la red, SMS (Short Message Service) puede transmitir los datos en la red GSM, haciendo que GPRS se encargue de las aplicaciones M2M. Sin embargo, en 2014 se espera que existan más de 428 millones y se espera que las aplicaciones M2M requieran mayor ancho de banda (en aplicaciones de vigilancia por ejemplo).

GPRS es una tecnología establecida y de bajo coste pero también tiene varias limitaciones que hacen difícil la compatibilidad con futuras aplicaciones M2M. La capacidad de una célula GPRS depende de parámetros como el factor de reuso. Sin embargo, si asumimos tan solo tráfico GPRS, la eficiencia espectral de una célula GPRS no supera los 100-150Kbps/célula/MHz [21].

Si además se tienen en cuenta los usuarios de voz activos, el número de usuarios soportados es muy limitado (<30). Por lo tanto, es obvio que la capacidad de GSM/GPRS es insuficiente para soportar las aplicaciones y servicios M2M futuros con miles de dispositivos por célula.

Otro aspecto de las redes GSM/GPRS es que obligan a que la conexión sea iniciada por el dispositivo. La técnica más empleada para establecer una conexión iniciada por el servidor es a

través de un mensaje SMS. Además, en las redes GSM/GPRS no existe una manera estandarizada de monitorizar el estado de las conexiones activas. Habitualmente los dispositivos informan periódicamente acerca de su estado o los servidores piden a los dispositivos que informen acerca de su estado (polling). Ambos métodos generan tráfico innecesario que limita aún más la capacidad de las células GSM/GPRS.

EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) es considerado como 2.5G, una tecnología pre-3G. El estándar pertenece a la 3GPP y se ubica dentro de GSM. Se desplegó inicialmente en 2003. Consigue unas tasas cuatro veces superiores a GPRS empleando nuevos métodos de codificación y transmisión. No es necesario realizar ningún cambio a nivel de software ni de hardware en la red troncal de GSM.

2.1.3.3.2 Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)

UMTS [22] es la tercera generación de telefonía móvil celular sucesora de GSM (Global System Telecommunications). Sus tres grandes características son sus capacidades multimedia, una velocidad de acceso a Internet elevada y transmisión de voz con calidad equiparable a la de las redes fijas.

Surge debido a la necesidad de un servicio de datos con tasas superiores a las que ofrecía GSM con GPRS y EDGE debido a la eclosión de las aplicaciones multimedia y de las WWW (World Wide Web).

Fue desarrollada por la 3GPP, la primera especificación surgió en el año 1999. La infraestructura radio cambia completamente con respecto a GSM. Emplea CDMA (Code Division Multiple Access) como tecnología de acceso a la red.

2.1.3.3.3 Long Term Evolution (LTE) [23]

En los últimos años, el volumen de datos en las redes celulares se ha multiplicado. Este aumento se ha producido junto con el paso de servicios de voz a servicios de datos de banda ancha. Hechos como la aparición de tarifas planas, nuevos terminales con facilidades para navegar por la web, módems USB para ordenadores y la evolución de la red para reducir el coste han provocado este aumento. Para satisfacer toda esta demanda, el 3GPP ha estandarizado LTE. Algunos criterios de diseño importantes han sido altas tasas de datos (100Mbps de media y picos de 300Mbps en bajada, y 50Mbps de media y pico de 75Mbps en subida), incremento de la eficiencia espectral de la célula (en un factor 2-4 comparado con HSPA *Release 6*), anchos de banda flexibles tanto para FDD (Frequency Division Duplex) como TDD (Time Division Duplex), reducción de la latencia en el plano de usuario a menos de 10ms y en el plano de control a menos de 100ms. Además, se ha diseñado una arquitectura radio plana para así reducir el coste y la complejidad. LTE debe coexistir con los sistemas 3GPP y 3GPP2 anteriores: TD-SCDMA (Time Division Synchronous Code Division Multiple Access), Wideband CDMA, HSPA y CDMA-2000). Los primeros sistemas LTE comerciales fueron probados por Teliasonera en 2009 en Oslo y Estocolmo. Otros operadores los han probado en 2010 y 2011.

La estandarización de LTE fue un gran paso hacia la telefonía móvil IMT-Advanced. Posteriores *releases* de LTE mencionan LTE-Advanced, que está destinado a lograr mayores velocidades.

Revisando las principales características de LTE, se puede concluir que está diseñado para soportar servicios de banda ancha. Para aplicaciones de banda estrecha con transmisiones esporádicas LTE no es eficiente en términos espectrales, energéticos y de coste.

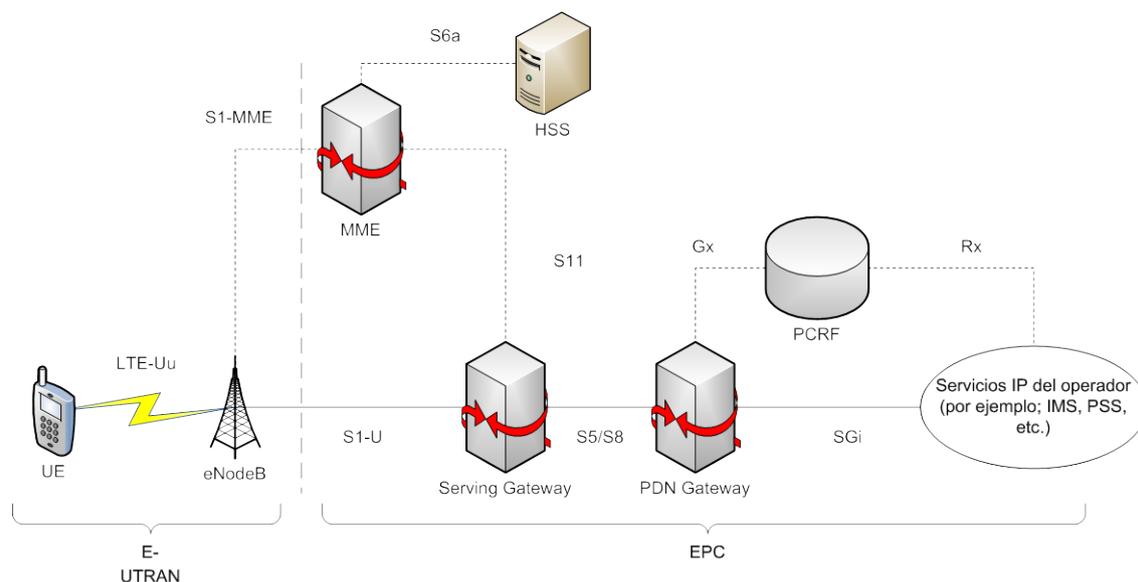


Figura 2.11 – Arquitectura LTE

En la Figura 2.11 de la parte superior se muestra la arquitectura de LTE que permite al usuario tener conectividad IP para acceder a internet así como para servicios de voz sobre IP. También da al usuario diferentes calidades de servicio en función del servicio usado, por ejemplo si tenemos una llamada de voz IP y estamos descargándonos un fichero de un servidor FTP (File Transfer Protocol). A un alto nivel la red está formada por el CN (Core Network) y la red de acceso E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access). El Core Network está compuesto de varios nodos lógicos mientras que la red de acceso está formada por un solo nodo llamado eNodeB (evolved NodeB) que se conecta con los UE's (User Equipment). Organismos de estandarización

2.2 Organismos de estandarización

Actualmente existen dos grandes iniciativas trabajando en la estandarización de los sistemas M2M. Por una parte ETSI ha definido una arquitectura flexible y completa para la construcción de servicios y aplicaciones definiendo interfaces y funcionalidades para cada elemento que participa en el sistema. 3GPP ha centrado sus esfuerzos en la elaboración de una arquitectura de red que sea capaz de soportar los requerimientos que plantean este tipo de comunicaciones en contraste con las comunicaciones típicas humano-humano. En las siguientes subsecciones se profundiza más sobre las grandes líneas de trabajo de ambos organismos.

2.2.1 European Telecommunications Standards Institute (ETSI)

El instituto europeo de estándares de telecomunicaciones [24] tiene como objetivo el desarrollo de estándares para las tecnologías de información y de las comunicaciones, incluyendo tecnologías fijas, móviles, radio, multidifusión e Internet. El ETSI está reconocido por la UE (Unión Europea) como una organización europea de estandarización.

Un nuevo comité técnico de la ETSI está desarrollando estándares para comunicaciones M2M. Este grupo tiene como objetivo proporcionar una vista end-to-end de la estandarización de las comunicaciones M2M. Los siguientes documentos son de interés para este proyecto:

- Especificaciones acerca de la arquitectura (TS 102 690). Este documento servirá para que diferentes organizaciones cooperen de acuerdo a la arquitectura definida.
- Casos de uso, especialmente E-health (TR 102 732) y Smart Metering (TR 102 691). Ya existen publicaciones sobre el caso de uso de E-health. Este documento técnico servirá como base para definir los requerimientos de los servicios M2M y las funciones en la arquitectura funcional de tal forma que se soporten los servicios E-health.
- Los casos de uso sobre Smart Metering han sido publicados en mayo de 2010 y formarán la base para futuros trabajos en Smart Metering relacionados con comunicaciones M2M.
- Los requisitos para proporcionar un servicio M2M (TS 102 869) incluyendo tanto requisitos generales como funcionales, seguridad, así como mecanismos de gestión han sido publicados en agosto de 2010.

2.2.1.1 Grupos

Los requisitos de servicio para comunicaciones M2M especificados por la ETSI permiten una comunicación fiable para un gran abanico de aplicaciones. Se muestran en la Tabla 2.3 unos ejemplos de aplicaciones:

Tabla 2.3 – Ejemplos de aplicaciones M2M de la ETSI

Seguridad	Aplicaciones de vigilancia, alarmas, seguimiento de personas/objetos.
Transporte	Gestión de flotas, control de emisiones, pago de peajes, seguridad vial.
Salud	E-health, seguridad personal.
Empresas de servicios públicos	Medida, aprovisionamiento y facturación de servicios públicos como el petróleo, el agua, la luz, la calefacción, etc.
Fabricación	Monitorización y automatización de la cadena de montaje.
Aprovisionamiento	Suministro de mercancías y control de distribución.
Gestión de instalaciones	Automatización de casas/edificios/campus

2.2.1.2 Objetivos

Los principales objetivos de la ETSI son los siguientes:

- Recopilar y especificar los requisitos de M2M de las partes interesadas. La ETSI reconoce que el diseño y la implementación de las redes M2M debe realizarse teniendo en cuenta las necesidades reales del mercado.
- Arquitectura *end-to-end* completa de alto nivel para M2M.
- Identificar brechas en las que los estándares existentes no satisfagan los requerimientos M2M. Arreglar esas brechas. El despliegue de las redes M2M no puede hacerse sin tener en cuenta los estándares y los sistemas actuales, pero deben mejorar

estos estándares y sistemas asegurándose una compatibilidad hacia atrás y una correcta operación tanto de los servicios M2M como de aquellos que no lo sean.

- Coordinación con otros grupos de estandarización.

2.2.1.3 Topología – Arquitectura

Los principales elementos de la arquitectura M2M de acuerdo a la ETSI son los siguientes:

- Dispositivo M2M: Un dispositivo que ejecuta aplicaciones M2M usando servicios M2M y funciones de red. Los dispositivos M2M pueden conectarse al core M2M directamente o a través de un gateway.
- Área de red M2M: Proporciona conectividad entre dispositivos y gateways M2M, por ejemplo tecnologías de redes de área personal como IEEE 802.15.x, ZigBee, Bluetooth, IETF ROLL, ISA100.11a, etc o redes de área local como PLC, M-BUS, Wireless M-BUS y KNX.
- Gateways M2M: Son equipos que usan servicios M2M para asegurar que los dispositivos M2M se comunican entre sí y a nivel de red y aplicación. El Gateway M2M también puede ejecutar aplicaciones M2M.
- Capa de red y aplicación M2M: Está dividida en red de acceso (para conectar dispositivos M2M a la red troncal), red de transporte (para transportar datos dentro del dominio de red y aplicación) y red troncal (incluye servicios básicos de red troncal, por ejemplo, 3GPP, 3GPP2, TISPAN y servicios M2M que proporcionan funciones M2M compartidas por varias aplicaciones y exponen estas funcionalidades a través de un conjunto de interfaces abiertas. Está soportado por funciones de gestión de red y gestión M2M).
- Aplicaciones M2M: Aplicaciones que ejecutan la lógica de servicios y usan servicios M2M a través de una interfaz abierta.

2.2.1.4 Requerimientos

La ETSI define los requerimientos para los servicios M2M de tal manera que se consiga una eficiencia end-to-end de los mismos. Aquellos más críticos son los siguientes:

- Comunicación a través de diferentes tecnologías, por ejemplo, SMS, GPRS y acceso IP. Conexión peer-to-peer entre terminales M2M. El sistema M2M debe permitir la comunicación entre las aplicaciones M2M en la capa de red y aplicación y el dispositivo o gateway M2M.
- Tiene que soportar diferentes modos de transmisión (unicast, anycast, etc). Siempre que sea posible un mensaje broadcast será enviado como multicast o anycast para minimizar el impacto en la carga total de la red.
- Selección de rutas. Hay que estudiar parámetros como el coste de la red, retrasos y fallos al enviar mensajes.
- Escalabilidad.
- Heterogeneidad. El gateway M2M debe poder atender a varias redes M2M.
- Primitivas de servicio, descubrimiento y registro.
- Movilidad, itinerancia.
- Conectividad continua.
- Jerarquía de servicio y QoS.

- Tanto los dispositivos M2M como los gateways deben soportar un timestamp seguro y robusto.
- Robustez en cuanto a fallos del dispositivo/gateway M2M. Después de un fallo por ejemplo de alimentación (se agota la batería) el dispositivo o gateway M2M debe volver a un estado completamente funcional de forma autónoma.
- Tiene que soportar diferentes aplicaciones M2M.
- Gestión de fallos, configuración, monitorización. El sistema M2M tiene que ser capaz de monitorizar la red para así intentar detectar posibles errores y corregirlos.
- Control remoto de los dispositivos M2M, carga asimétrica en la red, diversidad de rutas.
- Seguridad. Son de particular importancia en redes M2M aspectos como la autenticación, la confidencialidad de los datos transferidos, la integridad de los mismos y la privacidad.
- Direccionamiento.

2.2.2 3rd Generation Partnership Project (3GPP)

El 3GPP [25] es una colaboración entre grupos de asociaciones telecomunicaciones y es el principal organismo de estandarización para tecnologías 3G y en adelante. La estandarización del 3GPP comprende la interfaz radio, la red troncal y la arquitectura. 3GPP es una colaboración entre grupos como ARIB (Association of Radio Industries and Businesses), ATIS (Alliance for Telecommunications Industry Solutions), CCSA (China Communications Standards Association), ETSI (European Standards Telecommunications Institute), TTA (Telecommunications Technology Association) y TTC (Telecommunications Technology Committee). Los estándares del 3GPP están organizados en *Releases*. Cada nueva *Release* incorpora cientos de documentos con estándares, cada uno de los cuáles pueden haber pasado por varias revisiones.

En el año 2005, el 3GPP empezó a investigar cómo podrían mejorar los estándares para permitir servicios M2M. En septiembre de 2005 el 3GPP SA1 (Service and System Aspects) comenzó un estudio en “Facilitating Machine to Machine Communication in GSM and UMTS”, que en marzo de 2007 derivó en el reporte técnico TR 22.868 V8.0.0. Más tarde, en septiembre de 2007, el SA3 comenzó un estudio en “Remote Management of USIM Application on M2M Equipment”, que ha finalizado sin generar ninguna recomendación.

En mayo de 2008 surgió en el SA1 “Network Improvements for Machine-type Communications”. Los requerimientos están basados en el estudio previo del SA1.

2.2.2.1 Grupos

Las comunicaciones M2M tienen una gran diversidad de aplicaciones, por lo que es difícil diseñar casos de uso. En la Tabla 2.4 mostramos las áreas en las que las comunicaciones M2M son usadas.

Tabla 2.4 - Ejemplos de aplicaciones M2M del 3GPP

Seguridad	Sistemas de alarma, control de acceso, seguridad del coche/conductor.
Seguimiento y localización	Gestión de flotas, de pedidos, peajes, seguimiento de navegación, información de tráfico, optimización del tráfico.
Pagos	Puntos de venta, máquinas de vending, de juegos, etc.
Salud	Monitorización de constantes vitales para personas mayores o discapacitados, puntos de acceso web a telemedicina, diagnóstico remoto.
Control remoto	PLCs, sensores, control de luz, bombas, válvulas, ascensores, máquinas de vending, diagnóstico de vehículos.
Medidas	Medidas de energía, gas, agua, calefacción, medidas en industrias.

2.2.2.2 Objetivos

Los principales objetivos del 3GPP se resumen en:

- Mejorar los estándares 3GPP existentes para ofrecer servicios M2M con bajos costes operacionales.
- Facilitar al usuario M2M el manejo de grandes grupos M2M.
- Lograr un compromiso entre el esfuerzo empleado y los beneficios conseguidos con las mejoras.
- Especificar requerimientos para usar de manera más eficiente los recursos radio y de red.

2.2.2.3 Topología - Arquitectura

Los escenarios de comunicación analizados por el 3GPP incluyen dos tipos de dispositivos:

- Módulos wireless conectados a través de una RAN (Radio Access Network).
- Servidores centrales:
 - a) Dentro del dominio del operador móvil.
 - b) Conectado con una conexión dedicada desde el GGSN hasta los servidores, en este caso el GGSN desempeña funciones de routing y control de acceso.
 - c) Dentro de Internet, accesible a través de la PDN (Public Data Network) y el ISP (Internet Service Provider), es decir, sin conexión dedicada hasta los servidores.

Las posibles topologías analizadas son las siguientes:

- N:1 o N:M. Muchos módulos wireless comunicándose con uno o varios servidores centrales. Esta topología es la más apropiada para la operación comercial de M2M. Cada dispositivo en la red es distinguible de los demás y se considera que la comunicación sólo la pueden iniciar los dispositivos.
- Peer-to-peer. Muchos dispositivos wireless comunicándose entre sí.

2.2.2.4 Retos

El despliegue de las futuras redes M2M supone superar muchos retos, los más importantes son los siguientes:

- El gran número de dispositivos, que exigen diferentes políticas de gestión, por ejemplo, gestionar N terminales de un usuario M2M en un solo paso. Además, otro punto crítico es el overhead en la red debido a la señalización, especialmente en el caso de nodos móviles. El 3GPP ha propuesto que se usen el PNM (Personal Network Management) (TS 22.259) y el NC (Network Composition).
- Carga de tráfico. El volumen de tráfico puede variar en varios órdenes de magnitud. Los mecanismos de carga de tráfico actuales provocan un overhead innecesario. Al poder distinguir entre dispositivos M2M se pueden diferenciar las comunicaciones M2M para optimizar la gestión de la movilidad, el enrutamiento de las llamadas, por razones de seguridad y carga.
- Seguridad. Los aspectos relativos a seguridad son críticos en redes M2M debido a la gran cantidad de dispositivos y la continua señalización entre ellos.
- Direccionamiento de los dispositivos M2M. En la actualidad necesitamos un IMSI (International Mobile Subscriber Identity). Se estudiará un direccionamiento alternativo basado en direcciones IP.

2.2.2.5 Requerimientos

De acuerdo a los casos de uso analizados por el 3GPP se identifican los siguientes requerimientos críticos:

- Señalización óptima en aspectos de movilidad, es decir, no generar señalización para terminales estacionarios.
- Agrupar terminales similares, es decir, en base a su movilidad o actividad.
- Nuevas políticas de suscripción. Reducir las políticas de suscripción.
- Multiplexado y agregación de datos.
- Heterogeneidad.
- Gestión eficiente de la red.
- Redes auto-configurables en caso de fallo.
- Enrutamiento optimizado.

2.3 Escenarios de aplicación

Las posibilidades que ofrecen los sistemas M2M hacen que cubran prácticamente todo el espectro de aplicaciones de gestión remota de dispositivo. Actualmente los esfuerzos se están enfocando en tres grandes grupos:

- Sistemas de telemedida y monitorización conocidos por su acrónimo inglés como sistemas SMM.
- Sistemas de transporte inteligente (ITS)
- E-health, o aplicaciones remotas de monitorización y control de parámetros médicos.

La selección de escenarios como referencia se ha debido a:

- Previsiones, oportunidades y segmentación del mercado.
- El despliegue de redes LTE.
- Escenarios muy completos, ya que proporcionan servicios M2M completamente funcionales.

- La gran cantidad de requerimientos y retos que suponen estos escenarios.

A continuación se muestra una tabla (Tabla 2.5) comparando los diferentes escenarios en términos de número de dispositivos, cobertura y área de despliegue.

Tabla 2.5 – Características de los escenarios de aplicación

Escenario Características	Telemedida y monitorización	Sistemas de transporte inteligente	E-health
Número de dispositivos	Pocos (para aplicaciones domésticas)-Muchos	Número medio-Altos	Pocos-Número medio
Rango de cobertura	Extenso	Extenso	Extenso
Área de despliegue	Tamaño medio-Muy grande	Grande-Muy grande	Pequeño-Local (a nivel doméstico)
Impacto negativo esperado en los sistemas actuales	Medio	Alto	Bajo
Conectividad continua	Necesaria para medidas críticas (por ejemplo presión, calor)	No necesaria	Necesaria
Velocidad de transmisión	Baja velocidad de transmisión	Baja velocidad de transmisión	Baja velocidad de transmisión
Reportes periódicos	Sí	Sí	Probablemente
Movilidad	No o limitada	Alta	Media
Escalabilidad	Media	Media-Alta	Baja-Media
Heterogeneidad	Necesaria	Necesaria	Necesaria
Fiabilidad/Tolerancia a retrasos/Prioridad	Necesaria para medidas críticas	Baja prioridad	Alta prioridad
Autonomía	Alta	Alta	Alta
Eficiencia energética/Vida útil de la batería	Necesaria	No es crítica	Necesaria
Correlación (espacial/temporal) en los datos medidos	Espacial y temporal	Espacial y temporal	N/D
Variación temporal de los canales inalámbricos	Baja en escenarios rurales con sensores estáticos y alta en entornos urbanos con sensores móviles	Media-Alta	Baja-Media-Alta
Coste (incluido el mantenimiento de los dispositivos)	Dependiente de la aplicación	No es crítico	No es crítico

Las aplicaciones de telemedida y monitorización incluyen varios escenarios cada uno de ellos caracterizado por el tamaño de la red (a nivel doméstico, industrial, medioambiental), que a su

vez determinan los requerimientos. A continuación se estudia el caso de monitorización medioambiental, de gran interés para este proyecto.

Se prevé que las comunicaciones M2M crezcan rápidamente en este caso de uso debido al cambio climático y la contaminación. Las principales aplicaciones y servicios relacionados con la monitorización medioambiental serán:

- Monitorización remota de la calidad del agua.
- Monitorización remota del nivel de agua (para controlar inundaciones)
- Gestión óptima del agua para actividades agrícolas de forma remota.
- Monitorización remota de la calidad del aire.
- Monitorización remota de áreas como bosques para prevenir la destrucción del medio ambiente.

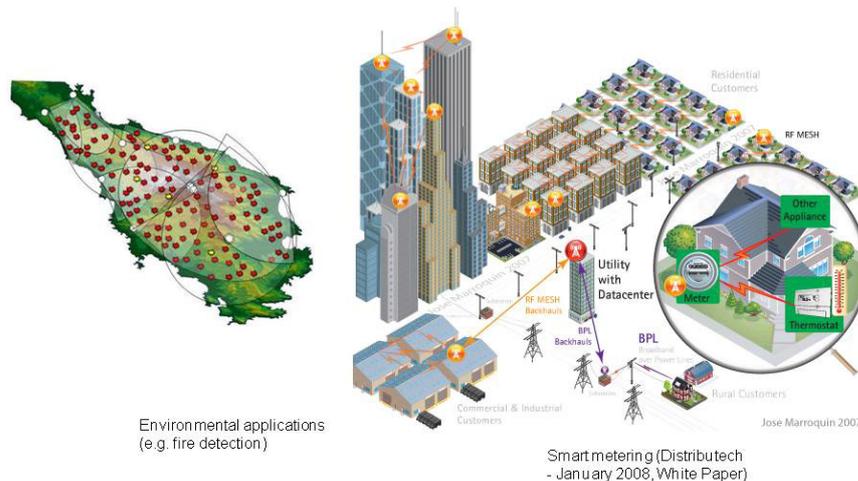


Figura 2.12 – Escenario Smart Metering [26].

Por otra parte, pueden medirse los niveles de contaminación en diferentes áreas de una ciudad mediante sensores desplegados en vehículos de transporte público, ya que de esta manera aseguramos medidas en casi todas las zonas de la ciudad (Figura 2.12). Si se añade un GPS a estos dispositivos, se puede determinar la localización de los vehículos y es posible identificar el área concreto en el que se han recopilado los datos. Se puede medir la concentración de dióxido de sulfuro (SO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), o cualquier otro gas dañino para el ser humano. Los sensores también pueden medir parámetros relacionados con las condiciones meteorológicas, como la temperatura, humedad y presión. La información se manda a los servidores de aplicación a través de una red de área extensa (LTE-M).

Las principales características de estas aplicaciones M2M son que operan en entornos exteriores y el gran despliegue necesario, los dispositivos tienen que cubrir grandes áreas geográficas de manera que no haga falta la intervención humana.

3 Diseño del protocolo

3.1 Introducción

El objetivo principal del proyecto es la evaluación de medidas de ahorro energéticas en redes capilares para aumentar la vida de éstas. Para alcanzar este objetivo se ha desarrollado un protocolo que permitirá a los elementos de los escenarios de simulación ser capaces de manejar toda la información necesaria que se requiere en este tipo de sistemas.

Como se explicó en la sección anterior, el protocolo diseñado en este proyecto está enfocado en las redes capilares, redes con una gran cantidad de dispositivos interconectados y con tasas de datos individuales muy bajas. Explotando las características y particularidades de las aplicaciones que son desplegadas mediante este tipo de topologías se pueden obtener grandes beneficios con propuestas como la desarrollada en este trabajo.

A lo largo de esta sección se detallarán todos y cada uno de los elementos que han guiado la toma de decisiones en la definición del protocolo propuesto; selección del caso de uso, definición de requerimientos del sistema y el detalle de los problemas surgidos durante la fase de diseño permiten dar una idea del proceso seguido y los obstáculos que se han ido salvando.

3.2 Caso de Uso

El protocolo se ha diseñado para dar cobertura a despliegues de un número elevado de dispositivos. Por este motivo, el caso de uso típico serán escenarios que impliquen soporte de numerosos de dispositivos, que formarán una red capilar y se comunicarán entre ellos hasta llegar al gateway. Por ejemplo, se podría desplegar este tipo de red en un bosque, y de esta manera monitorizar parámetros como temperatura, humedad, emisiones de gases, etc., de una forma remota y deslocalizada, suponiendo un ahorro considerable de costes. Programando cada dispositivo para la captura de datos y envío periódico, se posibilitaría el control detallado de lo que ocurre en el bosque. En la Figura 3.1 se muestra un despliegue típico, considerando redes multisalto jerárquicas:

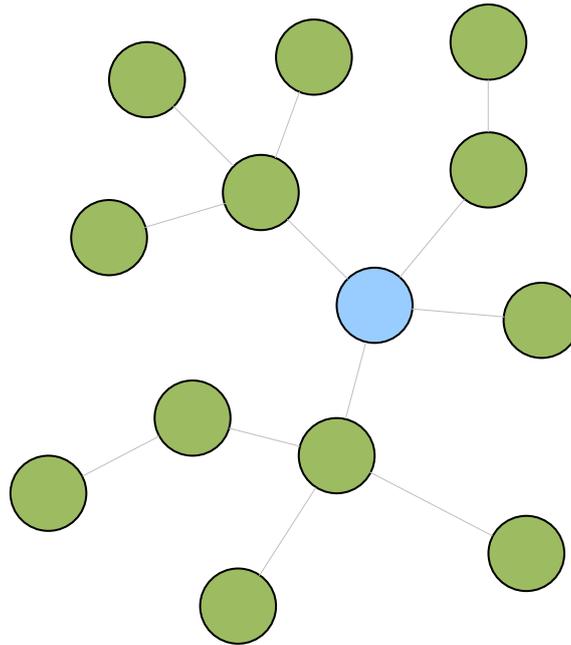


Figura 3.1 – Despliegue típico

El gateway se diferencia del resto de dispositivos (en verde) por su color azul. En un despliegue M2M típico como los introducidos en la sección anterior, la labor de los dispositivos finales es la recopilación de datos y su posterior distribución con la ayuda de los nodos vecinos, con el fin de alcanzar al Gateway (arquitectura multisalto). Este último se encargaría del envío a través de la red celular al servidor de aplicación remoto.

Las tasas de datos que se envían son muy bajas ($< 1\text{bps}$), ya que se hace uso de mensajes pequeños (tanto en payload como en cabeceras y señalización) y espaciados en períodos de tiempo considerables aunque el período de envío depende fuertemente del tipo de aplicación. Si la aplicación permite cierta latencia (las magnitudes medidas no cambian rápido), se puede aumentar este tiempo (con el consiguiente ahorro en batería y recursos), pero en aplicaciones en las que sea crítico el tiempo real, no habrá más remedio que usar intervalos más cortos.

El principal problema de este tipo de redes, y por el cual es necesaria la definición y uso de este tipo de protocolos orientados a la eficiencia energética, es que si se agota la batería con rapidez de alguno de los dispositivos se tiene que reemplazar in situ (suponiendo un alto coste). Además, la rapidez con que se agota la batería depende fuertemente de la topología de la red. Por todo esto, se ha diseñado un protocolo que, en función de la topología, selecciona el mejor gateway en términos de batería y cobertura, es decir, se busca maximizar la batería disponible y el número de zonas que se pueden cubrir (cobertura total de la red).

3.3 Problemas detectados

El principal problema a enfrentar es la optimización del consumo de batería y área cubierta en cada momento. Los despliegues típicos son estáticos y no consideran las ventajas que los bajos requerimientos de latencia puede introducir en el sistema.

Tras la situación inicial en la que todos los nodos están en condiciones de alta carga de batería y numerosos vecinos con los que ayudarse para las retransmisiones, según va avanzando la

vida de la red capilar, se presentan situaciones en las que no es fácil realizar decisiones para la reconfiguración de la red:

- Si se busca maximizar la batería, es posible que se seleccionen gateways que hagan que la red resultante sea pequeña (haya nodos que no puedan acceder a él por cuestiones de alcance y cobertura, por lo que quedarían aislados). La red resultante será más longeva, pero incluirá posiblemente un número de nodos reducido.
- Si, por el contrario, damos mayor relevancia al número de nodos involucrado en la nueva reconfiguración, es posible que se seleccione como Gateway a un nodo que ya no tenga mucho margen de batería, por lo que es posible que su rol dure poco y haya que lanzar una reconfiguración en un espacio de tiempo breve.

Siguiendo alguna de las dos alternativas expuestas, existen otros protocolos que eligen múltiples gateways, formando islas (como la aproximación que puede verse en la Figura 3.2) que, en cuanto se agote la batería de su nodo central, el resto de nodos quedan aislados, sin conexión posible a la red celular y, por lo tanto, imposibilitados para enviar sus lecturas al servidor de aplicación.

La selección dinámica de Gateway permite la distribución del sobrecoste energético del reenvío de mensajes entre los muchos que pueden desempeñar dicha función en despliegues como los presentados en los casos de uso.

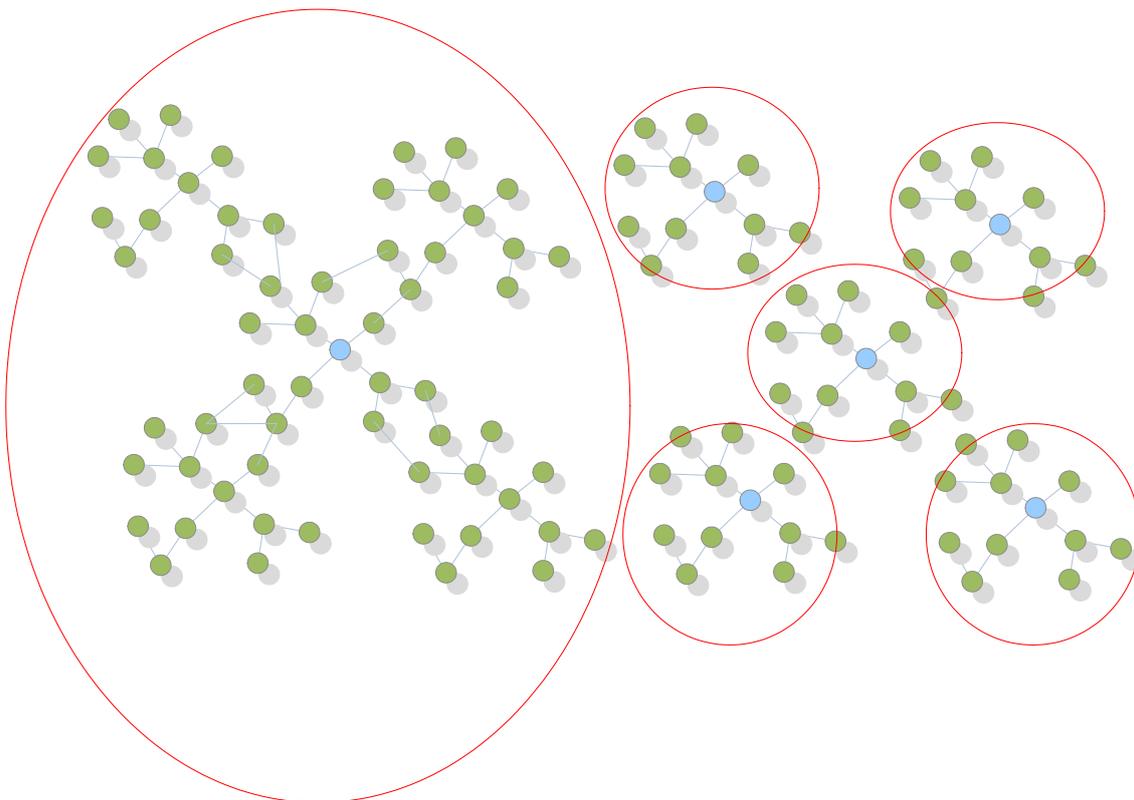


Figura 3.2 – Comparación entre estrategias para la selección del gateway

3.4 Requerimientos y supuestos

El objetivo principal del protocolo consiste en maximizar la vida útil de los nodos de la red, a la vez que se intenta cubrir el mayor área posible, maximizando de esta manera la cobertura.

De estos objetivos principales, se puede derivar la siguiente tabla de requisitos (Tabla 3.1), que engloba los principales, detallados en los siguientes requisitos de segundo nivel necesarios para conseguirlos y los medios que se necesitan para tal fin.

Tabla 3.1 - Lista de requerimientos

Requisito Principal	Requisitos derivados	Medios para lograrlo
Maximizar la vida útil de la red capilar	Preservar la batería de los nodos	Priorización de la selección de nodos con altos niveles de batería
	Obtener redes con el mayor número de nodos disponibles posible	Priorización de la selección de nodos estratégicos espacialmente.
	Crear rutas de transmisión con el menor número de saltos posibles	Priorización de la selección de nodos con gran número de vecinos.

En pos de la consecución de estos requerimientos, se ha supuesto un conocimiento previo de la topología de la red, esto es, del despliegue, ya que se hace un estudio previo del mismo para la elección óptima del gateway. De otra forma no sería posible la elección óptima del gateway en base a parámetros como el número de vecinos, o el número de nodos de la red, no sería posible conocerlos si no realizamos un estudio previo de la red.

De la misma forma, como base de protocolo de descubrimiento y creación de la jerarquía de la red se ha supuesto Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing (AODV). De este modo, es posible la evaluación del protocolo de selección óptima de Gateway sobre un protocolo de red ampliamente usado y extendido. Por tanto, los resultados están condicionados por la utilización de este protocolo como base. El uso de soluciones que optimicen el modo en que AODV descubre y organiza las redes, conseguirán asimismo mejoras en la actuación del protocolo de selección de Gateway.

Todos estos supuestos están resumidos en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 - Lista de supuestos.

Tipo de Asunción	Supuesto
Funcional	La red es conocida previa a la selección el Gateway óptimo.
	Sólo se va a seleccionar un nodo con el rol de Gateway de cada configuración
	La distribución espacial de los nodos es aleatoria
Protocolo de enrutamiento	El descubrimiento y gestión de la red se hace mediante un protocolo basado en AODV

Al hacer un supuesto tan importante como es la utilización de AODV, se hace necesaria una caracterización de las principales características del mismo, que permitan sentar la base sobre las que se sustentan los resultados expuestos en este proyecto.

3.4.1 Protocolo para la jerarquización y descubrimiento de la red: AODV

AODV [3] es un protocolo sencillo de descubrimiento de rutas basado en mensajes Hello para el descubrimiento de vecinos y en mensajes RREQ (Route REQuest) y RREP (Route REPLY) para el descubrimiento de rutas. AODV asegura rutas sin ciclos infinitos e intenta encontrar la ruta más corta.

Los mensajes Hello permiten descubrir a los vecinos, es decir, a los nodos a distancia de un salto.

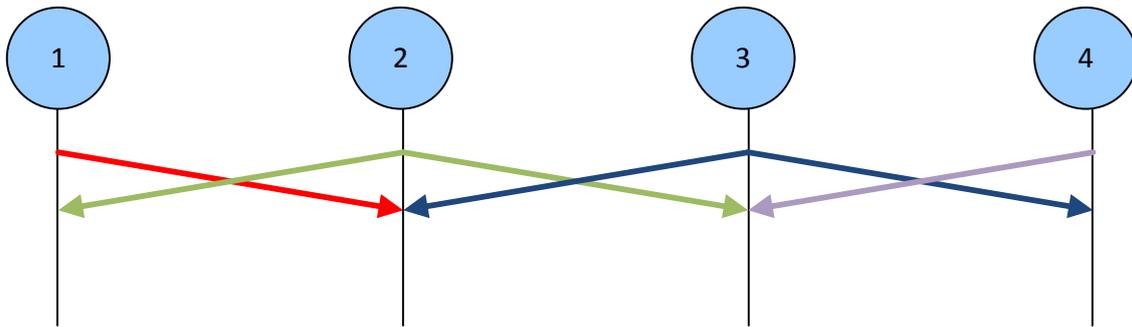


Figura 3.3 – Descubrimiento de vecinos mediante mensajes Hello

En la Figura 3.3 se ilustra el proceso de descubrimiento de vecinos mediante mensajes Hello, al finalizar el proceso, las tablas de rutas de los nodos quedan tal y como se muestra en la siguiente tabla (Tabla 3.3).

Tabla 3.3 – Tabla de rutas después del intercambio de mensajes Hello

Nodo	Tabla de rutas		
	Vecino	Siguiente salto	Distancia
1	2	2	1
2	1,3	1,3	1
3	2,4	2,4	1
4	3	3	1

Después del intercambio de mensajes Hello, los nodos tienen información de sus vecinos, pero no de toda la red, para ello es necesario el intercambio de mensajes RREQ y RREP entre cada pareja de nodos de la red.

Cuando un nodo quiere enviar un mensaje a otro que no forma parte de sus vecinos, envía un paquete RREQ broadcast, que por lo tanto es recibido por todos sus vecinos. Éstos, a su vez, lo distribuyen a todos sus vecinos menos al que se lo ha transmitido previamente, y así hasta encontrar al destino final. Cuando el destino final recibe un RREQ con dirección de destino su dirección, reconoce que él es el destino final y envía un RREP unicast hacia el nodo que inició el RREQ, siguiendo la misma ruta que dicho mensaje.

Los formatos de los mensajes RREQ y RREP pueden verse en los siguientes diagramas (Figura 3.4 y Figura 3.5).

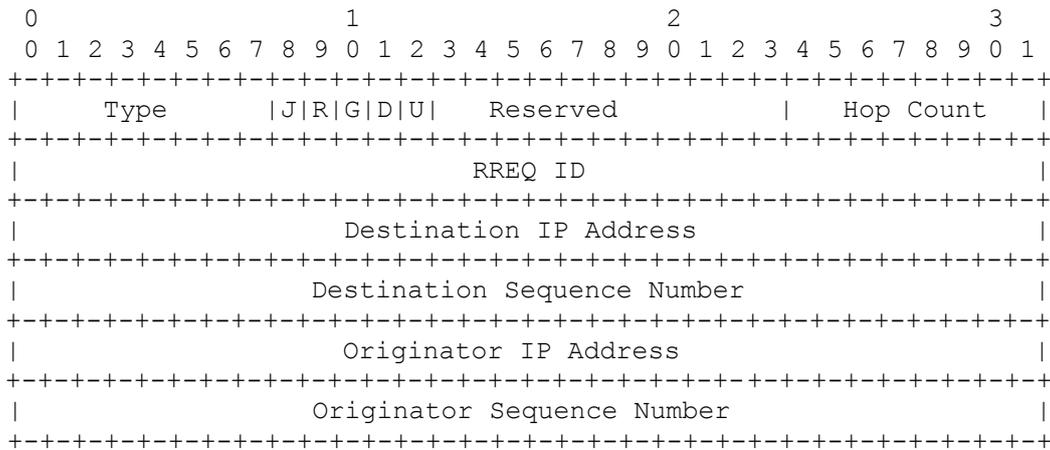


Figura 3.4 - Formato del mensaje RREQ.

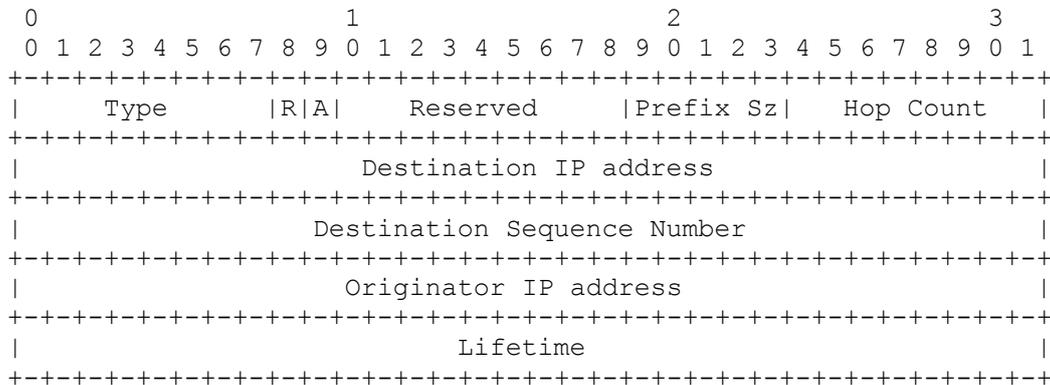


Figura 3.5 - Formato del mensaje RREP.

A continuación se muestra en la Figura 3.6 un ejemplo de descubrimiento de rutas entre el nodo 1 y el 4 siguiendo el ejemplo anterior:

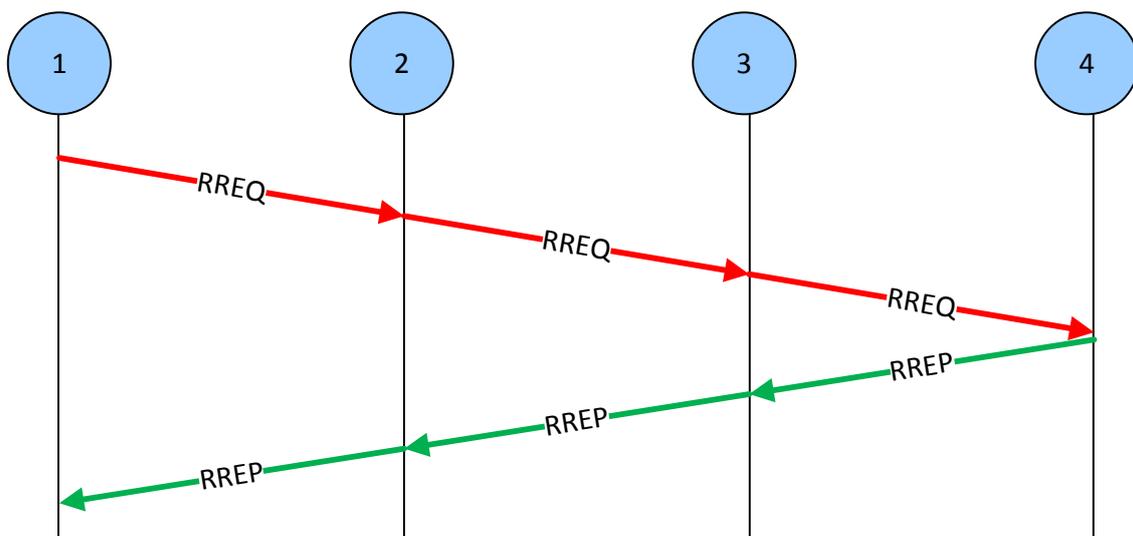


Figura 3.6 – Descubrimiento de rutas entre el nodo 1 y el nodo 4

El proceso puede resumirse como sigue:

1. El nodo 1 envía un RREQ broadcast que es recibido por todos sus vecinos, en este caso sólo el nodo 2 lo recibe.
2. El nodo 2 comprueba si es él el destino final, como no lo es lo retransmite a todos sus vecinos, menos al nodo 1, aumentando en 1 el número de saltos.
3. El nodo 3 lo recibe, comprueba si es él destino final, y como no lo es, lo retransmite a todos sus vecinos menos al nodo 2 y aumenta en 1 el número de saltos.
4. El nodo número 4 recibe el RREQ, comprueba el destino final, es él, así que añade al nodo 1 con la distancia que va en el campo número de saltos del paquete RREQ y como siguiente salto pone el nodo del que ha recibido el RREQ.
5. Finalmente, el nodo 4 genera un paquete RREP que sigue la misma ruta que el RREQ.
6. Cuando el nodo 1 lo recibe añade al nodo 4 a su tabla de rutas.

Las tablas de rutas de los nodos quedarían tal y como se muestra en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4 - Tabla de rutas tras los mensajes RREQ y RREP.

Nodo	Tabla de rutas		
	Vecino	Siguiente salto	Distancia
1	2,4	2,2	1,3
2	1,3	1,3	1
3	2,4	2,4	1
4	3,1	3,3	1,3

El protocolo diseñado tiene información de contexto (estado de la batería del nodo, número de vecinos, etc) que va en el campo de datos del paquete RREQ, de esta manera los nodos tienen información acerca de sus vecinos y se pueden aplicar las diferentes funciones de peso para una selección óptima del gateway de la red en cada momento.

Este formato de mensajes será el que se usará para calcular la batería consumida por los nodos en cada reconfiguración. Para ello, y a la vista de las bases del protocolo de intercambio de mensajes descrito, se utilizará la siguiente fórmula, que determina el número de mensajes retransmitidos para la creación de la red dependiendo de la separación en número de saltos de un nodo con respecto al Gateway:

$$L_0 = P_{Rx} \quad (1)$$

$$L_1 = N_{Vecinos} \cdot (2 \cdot P_{Rx}) + 2 \cdot P_{Tx} \quad (2)$$

$$L_2 = N_{Vecinos} \cdot (2 \cdot P_{Rx}) + 2 \cdot P_{Tx} \quad (3)$$

$$L_3 = N_{Vecinos} \cdot (2 \cdot P_{Rx}) + P_{Tx} \quad (4)$$

Este cálculo asume que la red tiene, como máximo 3 saltos. Los nodos en el nivel 0 o nivel 3 sólo reciben y transmiten a un nivel (ya sea el inferior en el primer caso o el superior en el

segundo), mientras que los de niveles intermedios tienen que monitorizar el estado de sus niveles predecesor y sucesor y enviarles mensajes.

$N_{Vecinos}$ denota el número de vecinos que tiene cada nodo. Si se asignan valores a las potencias de transmisión (P_{Tx}) y de recepción (P_{Rx}), se puede dimensionar el consumo de batería resultante de cada reconfiguración de la red.

4 Características del simulador desarrollado

4.1 Introducción

La evaluación de escenarios con una gran cantidad de nodos requiere de un gran esfuerzo con lo que los cálculos analíticos no son una opción viable para la obtención de resultados en un estudio como el realizado en este proyecto. Por este motivo, se ha desarrollado un simulador propietario para comprobar la validez de las propuestas realizadas en este proyecto.

A lo largo de esta sección se presentará en detalle las características que se integran en el simulador desarrollado, presentando tanto los módulos como las técnicas que han sido implementados en él.

Como introducción general al mismo, cabe decir que se ha desarrollado en un entorno de programación C++ [27] [28]. Se ha elegido C++ por su eficiencia y por su facilidad para portarlo a otros lenguajes en caso de ser necesario. Se ha usado la herramienta gratuita Eclipse [29] para el desarrollo.

El uso de C++ facilita la rapidez y eficacia a la hora de manejar estructuras con gran cantidad de datos, lo que posibilita la simulación de escenarios que engloben multitud de dispositivos con capacidad de añadir variables de entorno complejas.

Antes de optar por esta solución, se probó la implementación en otros sistemas como Matlab [30]. A pesar de las ventajas que ofrece este software por la versatilidad a la hora de implementar herramientas matemáticas y representar de forma directa los resultados obtenidos, sus largos tiempos de simulación en escenarios complejos aconsejaron optar por desarrollos en C++.

No obstante, se ha hecho uso de ambas herramientas, incluso en fases avanzadas del proceso en las que casi todo se integraba en el entorno C++, ya que Matlab ofrece funciones de representación de datos muy eficientes que pueden usarse en combinación con las salidas recogidas del proceso C++.

4.2 Configuración del simulador

A continuación se explicará la configuración previa necesaria a realizar en el simulador para obtener los resultados deseados. Para especificar la configuración al simulador se ha usado un fichero de configuración en el que se han definido todos los parámetros. Fichero de configuración

Como ha sido presentado con anterioridad, el objetivo es la evaluación de medidas de ahorro energético en despliegues de dispositivos a gran escala. El escenario de simulación que ha sido configurado viene delimitado en sus propiedades y en la de los elementos que lo componen en base a los valores asignados en un fichero de configuración.

A continuación se muestra el formato del fichero de configuración y se explican los parámetros del sistema.

```
# X length
X_LENGTH=300

# Y length
Y_LENGTH=300

# Number of Nodes
N_NODES=225

#GW Probability
GW_P=0.6

#Radio coverage
RADIO=25

#GW selection
GW_SELECTION=RANDOM_DEPL

#Deployment
DEPLOY=RANDOM_DEPL
```

Por orden de aparición, la labor de cada parámetro puede resumirse como sigue:

- Los primeros dos parámetros definen las dimensiones de la rejilla sobre la cual se van a desplegar los nodos, también se puede especificar el número de nodos que se desee.
- A través del parámetro *GW Probability* se puede determinar el número de gateways que se tendrán en la red (como se ha comentado en apartados anteriores existen Gateways y Dispositivos Finales), el resto de nodos serán por lo tanto Dispositivos Finales.
- El parámetro *Radio coverage* fija el radio de cobertura que posee cada nodo, a mayor radio de cobertura mayor alcance.
- Los dos últimos parámetros son muy importantes, el primero de ellos permite realizar la selección de los nodos que pueden ser gateway de forma aleatoria o bien mediante una función. Esta función recorre cada nodo de la red y suma la distancia a todos los demás nodos de la red, se eligen aquellos gateways cuya distancia mínima sea menor.
- Por último, el parámetro *Deployment* especifica el despliegue de los nodos en la rejilla, puede ser aleatorio o bien uniforme, a continuación, en la Figura 4.1 se pueden ver ambos tipos de despliegue.

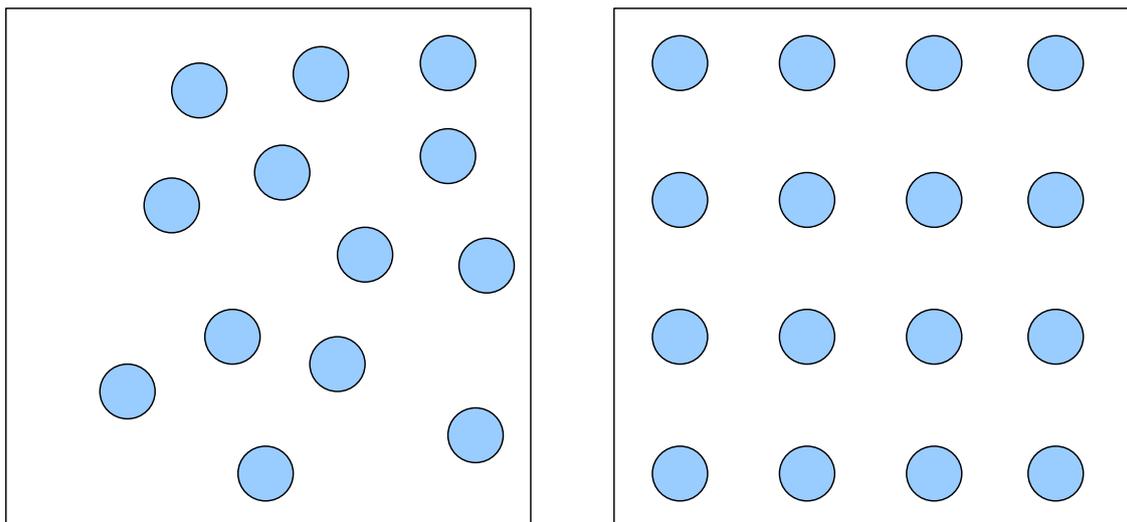


Figura 4.1 – Despliegue aleatorio y despliegue uniforme

Un parámetro que no se ha incluido en el fichero de configuración (pero que se tiene en cuenta en el procesado) es el número máximo de saltos. Este parámetro fija la distancia máxima en saltos a la que un nodo puede tener vecinos. Lo mismo ocurre con el umbral de reconfiguración, que determina el nivel de batería del gateway a partir del cual se produce una reconfiguración de la red.

4.3 Módulos creados

Una de las grandes ventajas de C++ y que lo define como un lenguaje orientado a objetos es la posibilidad de definir clases.

El propósito de las clases en C++ es facilitar al programador una herramienta que le permita definir un nuevo tipo que se pueda usar como un tipo predefinido de C++. En particular, las clases de C++ facilitan un mecanismo que permite prohibir los accesos directos a la representación interna de un tipo, así como indicar claramente cuáles son las operaciones básicas definidas para el tipo.

Mediante esta potente herramienta, es posible la definición de todos y cada uno de los modelos necesarios para llevar a cabo las simulaciones del protocolo propuesto. La lista de diferentes entidades que juegan un papel en el desarrollo del simulador, y por tanto del protocolo de selección óptima de Gateway, son los siguientes:

Tabla 4.1 - Mapeo de entidades con su clase correspondiente

Entidad	Nombre del módulo
Variables de entorno (configuración)	ConfigurationFile
Nodos	Node
Dispositivos finales	EndDevice
Gateways	Gateway
Escenarios	Scenario

La relación entre las clases que han sido desarrolladas es la que se muestra en la siguiente figura (Figura 4.2). En ella se muestra en rojo los ficheros de entrada y salida de datos, en verde los mecanismos auxiliares que caracterizan el funcionamiento de cada uno de los elementos del escenario de simulación, y finalmente, en azul, el núcleo principal del simulador donde se ejecutan todas las operaciones necesarias para la obtención de resultados.

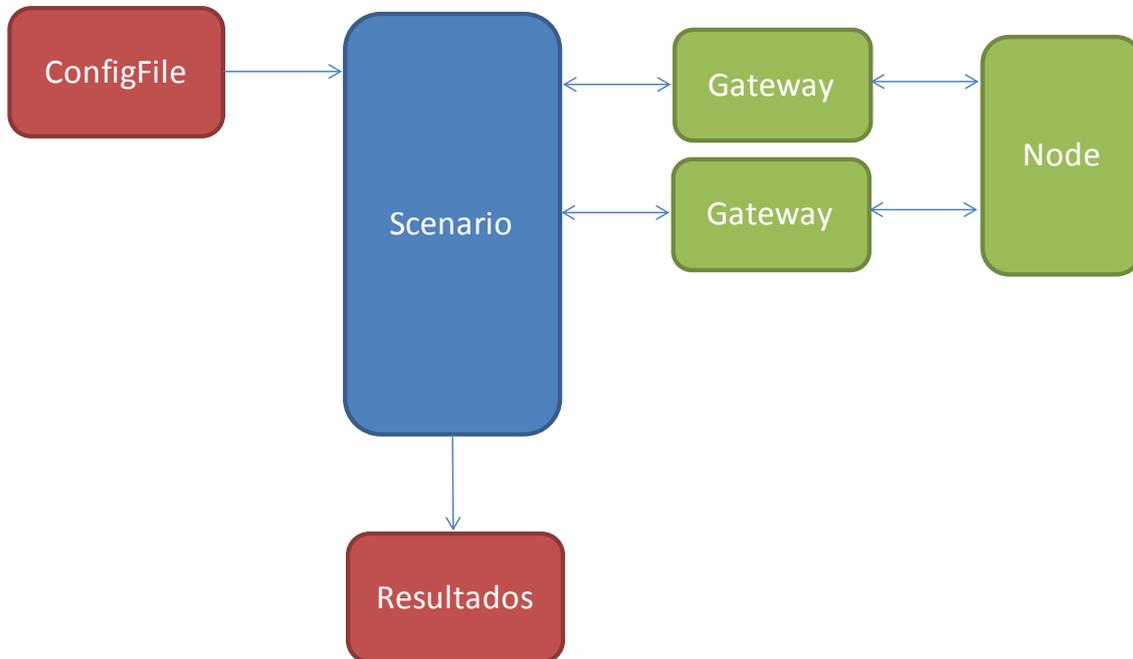


Figura 4.2 – Relación entre clases del simulador

Todos estos elementos se definen mediante clases, las cuales se exponen a continuación.

4.3.1 ConfigurationFile

Esta clase permite usar un fichero de configuración en texto plano como parámetro de entrada a nuestro simulador.

- En la clase ConfigurationFile se define una estructura que recibe los parámetros que se le pasarán como argumentos de entrada al simulador. El siguiente bloque de código muestra en detalle la estructura.

```

typedef struct configuration{
    char *gw_selection;
    int x_length;
    int y_length;
    int n_nodes;
    int radio;
    float gw_p;
    char *deployment;
    bool success;
}configuration_t;
  
```

- A continuación se muestra la declaración de la clase ConfigurationFile

```

class ConfigFile {
public:
    ConfigFile();
    configuration_t LoadConfig(string fileName);
private:
    int suppressSpaces(char *line);
    int readLine(char *line);
    configuration_t scenario;
    string channel_name;
};

```

Tenemos varias funciones, destacar entre ellas, la que se encarga de cargar el fichero de configuración (*LoadConfig*). Otra función importante es *readLine*, que lleva a cabo la lectura línea a línea del fichero de configuración e introduce en la estructura definida previamente los datos leídos.

4.3.2 Node

Se encarga de definir los parámetros comunes a todos los nodos, batería, número de mensajes enviados, número de vecinos, etc. Contiene funciones para fijar la ruta al gateway, obtener el número de vecinos de un nodo, su posición en la rejilla. En principio se pensó en crear una sola clase para Gateways y Dispositivos Finales, pero teniendo en cuenta que físicamente son dispositivos diferentes se optó por crear dos clases que heredasen las propiedades de Node y así tener cada tipo de dispositivo claramente diferenciado.

```

float xpos, ypos; //2D Position
int nodeId;
float batteryStatus;
int interPktTime; // Frecuencia de envio de mensajes
int msg_till_death; // Número de mensajes hasta agotar batería
int msg_sent; // Contador de mensajes de cada nodo
int current_msg; // Contador de mensajes de cada nodo que se pone a
cero cuando supera a interPktTime
vector<int> neighs;
vector<int> rutaAlGw;
int distanceToGw; //Nivel
int nextHop; // Padre

```

En el cuadro de texto superior se muestran las variables de la clase Node, entre ellas:

- Posición del nodo en la rejilla.
- Batería restante.
- Número aleatorio entre 0 y 19 que indica la frecuencia de envío de mensajes.
- El número de mensajes que se han enviado por todos los nodos de la red hasta que el nodo se queda sin batería.
- El número de mensajes totales que envía el nodo.
- Un contador que se pone a cero cuando el número de mensajes enviados por el nodo supera al número aleatorio que indica la frecuencia de envío de mensajes.
- Un vector con el número de vecinos del nodo.

- Un vector que contiene la ruta hasta el gateway.
- La distancia al gateway.
- El siguiente salto en la ruta hasta el gateway.

A continuación se muestran las funciones de las que dispone la clase Node

```
node();
virtual ~node();

inline float getBattery() {
    return batteryStatus;
}
inline int getDistanceToGw() {
    return distanceToGw;
}
inline void setPosition(float x, float y) {
    xpos = x;
    ypos = y;
}
inline float getXPosition() {
    return xpos;
}
inline float getYPosition() {
    return ypos;
}
void setRouteToGW(vector<int> rutaAlGw);

inline void addNeigh(int neighNode) {
    neighs.push_back(neighNode);
}
inline vector<int> getNeighs() {
    return neighs;
}
inline void clearNeighs() {
    neighs.clear();
}
void getRouteToGw(int);
void printRoute(int);
void setNodeTopology(node*, map<int, int> path);
```

Entre las funciones se encuentran funciones para fijar la posición de un nodo, obtener su posición, sus vecinos, su ruta al gateway, añadir un vecino a su lista de vecinos, etc.

4.3.3 EndDevice

Esta clase es una herencia de la clase Node, por lo tanto tiene las mismas propiedades pero además incluye parámetros inherentes a los Dispositivo Finales.

```
EndDevice::EndDevice(int node, int x, int y, int t) {
    // TODO Auto-generated constructor stub
    xpos = x;
    ypos = y;
    nodeId = node;
    interPktTime = t;
}
```

El cuadro de texto anterior muestra la declaración de la clase EndDevice, como se puede observar hacemos el *include* de la clase Node, de esta forma, hereda todas las funciones y variables de la misma.

```
#include "node.h"

namespace std{

class EndDevice: public node {
public:
    EndDevice(int, int, int, int);
    virtual ~EndDevice();
};

#endif /* ENDDDEVICE_H_ */
}
```

En la figura superior se muestra el constructor de la clase EndDevice, contiene cuatro argumentos, la posición (coordenadas x e y), el id del nodo y la frecuencia de envío de mensajes.

4.3.4 Gateway

Como ya se ha comentado se trata de una clase que hereda las propiedades de la clase Node, contiene información adicional como la tabla de rutas de cada gateway. A continuación se mostrarán las funciones y variables de la clase Gateway.

A continuación se muestra la declaración de la clase Gateway. Contiene una estructura para guardar la información de la ruta hacia los demás nodos.

```
#include "node.h"

namespace std{

// This struct contains all info included in GW routing table for
// each node
struct routingInfo{
    int next_hop;
    int hop_distance;
};

class Gateway: public node {
public:
    Gateway(int, int, int, int);
    virtual ~Gateway();
    void addElementToRT(int dest, int next_hop, int distance);

private:
    std::map<int, routingInfo> rTable;
};
```

El constructor es idéntico al de la clase EndDevice, tenemos que indicar su posición en el plano, su id y su frecuencia de envío de mensajes de datos.

```
Gateway::Gateway(int node, int x, int y, int t) {
    // TODO Auto-generated constructor stub
    xpos = x;
    ypos = y;
    nodeId = node;
    interPktTime = t;}
}
```

4.3.5 Scenario

En esta clase se realizan la mayoría de las funciones del simulador, como la búsqueda de vecinos, el intercambio de mensajes Hello, RREQ y RREP, la simulación de envío de mensajes, la formación de la topología de la red, etc. Es el núcleo del simulador.

Contiene numerosas variables y funciones, mencionaremos algunas de las más importantes.

- Funciones:
 - Creación del escenario.
 - Búsqueda de vecinos.
 - Creación de la topología.
 - Selección del gateway.
 - Simulación de envío de mensajes.

- Variables:
 - Parámetros del escenario: dimensiones, número de nodos, despliegue, radio de cobertura, etc.
 - Vectores con los nodos que se han quedado sin batería, mensajes han sido enviados por cada nodo, nodos que tienen batería, etc.
 - Mapas de memoria con la lista de gateways y Dispositivo Finales.

Se muestra a continuación la declaración de la clase scenario con todas sus funciones y variables.

```
class scenario{
public:
    scenario();
    virtual ~scenario();
    scenario(float, float, int, float, int, int, int, int, int, float,
float, float);

    inline int getGWListSize(){
        return GateWayList.size();
    }

    int GW;

private:
    FILE *fp10;
    vector<int> GW_status;
    vector<int> nodesWithinNt; // nodes within the network
    vector<int> nodesOutNt; // nodes outside the network
    vector<int> nodesOutNtWithBatt; // nodes with remaining battery but
outside the network
    vector<int> numberNodesOutNtWithBatt; // number of nodes with remaining
battery but outside the network
    vector<int> messagesSentOutNtWithBatt; // total messages sent
    vector<int> nodes_down; // list containing dead nodes
    vector<int> number_nodes_down; // number of dead nodes
    vector<int> messagesSentDown; // total messages sent
    vector<int> nodesAlive; // list containing alive nodes
    vector<int> gwAvailable; // list containing available gw's
    vector<int> isolatedNodes; // list containing isolated nodes
    vector<int> numberIsolatedNodes; // number of isolated nodes
    vector<int> messagesSentIsolated; // total messages sent
    vector<int> distancias;
```

```

float base, altura; // Definicion rejilla
float gw_pb; // Probabilidad de que un nodo sea GW
int total_nodes; // #nodos total del escenario
int despliegue;
int seleccion;
int radio_cobertura;
int funcion_peso;
int N_SIM;
int N_RECONF;
float alpha, beta, gamma;
float p_tx;
float p_rx;
int ady [MAX_NODES][MAX_NODES]; //matriz de adyacencia
float msg_totales;
int Tmax;
float meanK;
deque<int> path; // camino minimo de dijkstra
int caminosPosibles; // cantidad de caminos posibles

map<int, Gateway*> GateWayList;
map<int, EndDevice*> EndDeviceList;
map<int, map<int, int> > topology;

void uniformSelection();
void escenarioDeploy();
void escenarioDefinition();
void printScenario();
void printScenarioParams(int);
void neighs(int);
void createTopology(int);
vector<int> searchNeighs(int);
float getDistance(node*, node*);
float getDist(float, float, float, float);
vector<int> getNodesAlive();
int GWselection(int);
void printLevels();
void addNodeToTopology(node*, int);
void setNodeProperties(node*);
node* findNode(int);

bool batteryDrainHello();
bool batteryDrainRREQREP();
void printfBattery();
vector<float> messageExchange();
float weight(int);

void dijkstra(int, int final=0);
vector<int> sort(vector<int>);
};

```

4.4 Procedimientos implementados

Una vez definidos los elementos que componen la base del simulador y sobre los que se pueden operar, es el momento de definir los procedimientos que se han de seguir para la obtención de resultados.

Las siguientes funciones constituyen el corazón del simulador. Las mismas, pueden ejercerse sobre la totalidad o un subconjunto de entidades previamente definidas.

Por orden de utilización en el proceso seguido por el simulador, las funciones son las siguientes:

1. Asignación de rol y posición inicial de cada nodo, de modo que se fije el despliegue particular de cada simulación y los roles de partida.
2. Fijado de las funciones de peso, que determinarán la selección de la próxima tanda de gateways.
3. Definición de la topología de la red, partiendo de los gateways y jerarquizando la red hasta cubrirla en su totalidad.
 - a. Para ello, se comienza con el envío de mensajes Hello a vecinos.
 - b. Después se intercambian mensajes RREQ y RREP para la creación de las rutas.
4. Una vez definida la red, se comienza con la operativa general, realizando el envío periódico de paquetes de datos.
5. Finalmente, se chequea periódicamente en busca de eventos (fijados por las funciones de peso) que hagan que se ejecute una nueva reconfiguración.

A continuación se muestra un diagrama de bloques del proceso (Figura 4.4).

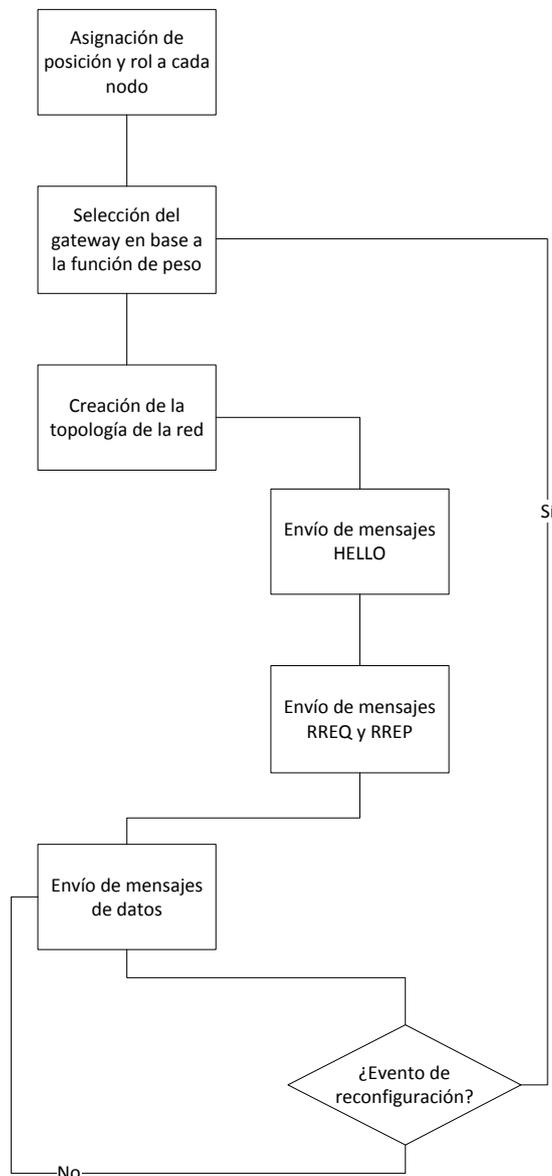


Figura 4.4 – Diagrama de bloques de los procedimientos implementados

Todos estos procedimientos se detallan a continuación.

4.4.1 Asignación de rol y posición a cada nodo

En principio tenemos tantos objetos de la clase Node como número de nodos hayamos especificado en el fichero de configuración. Mediante el parámetro *GW Probability* y el número de nodos creamos tantos objetos de la clase Gateway como resulte de su multiplicación, el resto de nodos serán Dispositivo Finales. Por ejemplo, si tenemos una *GW Probability* de 0.4 y el número de nodos es 200, tendremos 80 nodos de la clase Gateway y 120 de la clase Dispositivo Final.

La posición de cada nodo en la rejilla es bien aleatoria o bien uniforme como ya se ha explicado anteriormente.

4.4.2 Funciones de peso

Una vez asignada la posición y el rol de cada nodo se procede a la selección óptima del Gateway.

Para ello, se han implementado tres estrategias diferentes. Mediante las mismas, será posible la evaluación del algoritmo y la comparación de resultados.

4.4.2.1 Aleatoria

El Gateway es elegido al azar entre el total de nodos de la red. Lógicamente, esta elección no es óptima pero nos servirá para comparar con las demás estrategias.

Mediante la caracterización de esta técnica, es posible tener un punto de partida sobre el que comparar el ahorro energético o la extensión en la longevidad de la aplicación del resto de opciones.

Cabe destacar, que aunque la selección sea aleatoria, siempre esta opción es mejor que mantener los roles iniciales, ya que en cuanto se agotase la batería de los gateways la red quedaría inutilizada, por lo que este supuesto no es una base válida sobre la que comparar.

4.4.2.2 Primera función de peso

Esta función de peso elige como gateway aquel que tenga el producto batería restante por número de vecinos mayor. En la siguiente figura se muestra la ecuación que sigue esta función de peso.

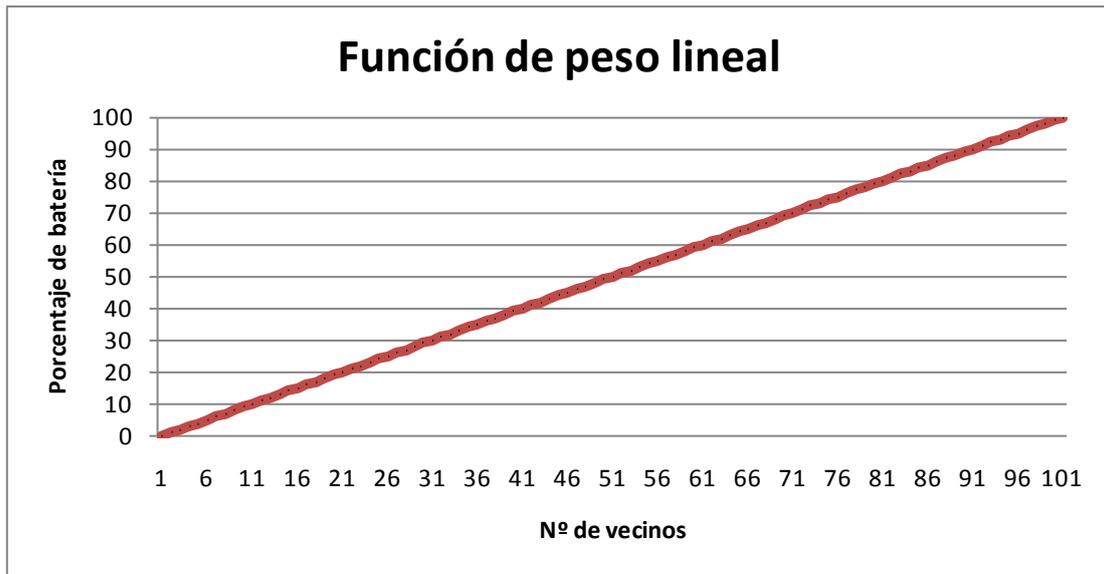


Figura 4.5 – Ecuación de la función de peso lineal

$$Peso = \text{Batería restante} * N^{\circ} \text{ de vecinos} \quad (5)$$

En la primera simulación como todos los nodos tienen el nivel de batería al máximo se elegirá como gateway al que tenga el mayor número de vecinos, pero habrá un punto en que la batería disminuirá y se seleccionará un gateway con mayor nivel de batería pero con menor número de vecinos. Hay que tener en cuenta que tanto la batería como el número de vecinos de cada nodo varían, ya que cuando un nodo se queda sin batería se elimina de la lista de nodos activos y, por tanto, no aparece como vecino de otros.

En la Figura 4.6 se muestra cómo varía la función de peso a medida que se va consumiendo la batería para un ejemplo de una red de 4 nodos como la expuesta en la sección 3.4.1. Se ha supuesto que los cuatro nodos pueden actuar como Gateway o Dispositivo Final indiferentemente. En cada reconfiguración si el nodo ejerce el rol de Gateway gasta un 25% del total de su batería y si actúa como Dispositivo Final un 10%. Se ha usado la misma topología de los cuatro nodos usada anteriormente.

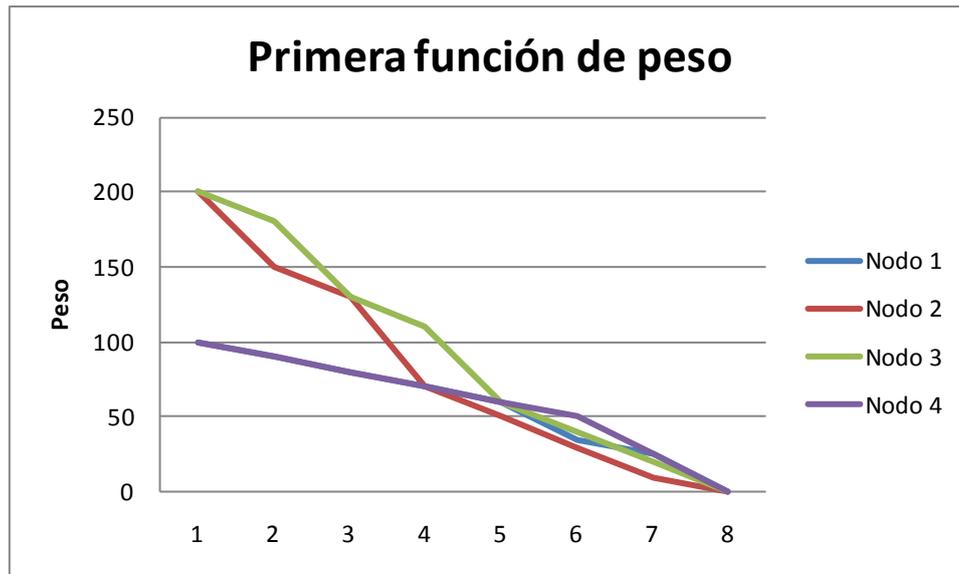


Figura 4.6 – Primera función de peso

Al principio el nodo 2 se selecciona como Gateway. A pesar de que el nodo 4 es la peor elección a priori, tras haber transcurrido una serie de tiempo (denotada en número de reconfiguraciones en el eje X) y haberse seleccionado el resto de nodos como Gateway, se puede observar que llega un momento (sobre la reconfiguración número 6) en el que el nodo 4 ya es la mejor elección.

4.4.2.3 Segunda función de peso

Esta función de peso, además de tener en cuenta la batería disponible y el número de vecinos, también incluye información acerca del número de saltos desde todos los nodos de la red hasta el posible gateway. Para evaluar este último parámetro es necesario que la topología de la red esté ya establecida en el momento de la selección. La creación de la topología se explica en la sección 4.4.3.

A continuación, se explican las operaciones que realiza la segunda función de peso:

- Se elige un gateway de todos los disponibles
- Se crea la topología en el caso de que el gateway elegido fuese el gateway seleccionado
- Se recorren todos los nodos de la red y se guarda la distancia desde cada uno de ellos al gateway elegido
- Se evalúa el número de vecinos de todos los nodos
- Finalmente, se comprueba la batería del gateway elegido.

Una vez concluida esta operación para el primer Gateway posible, se elige otro y se realiza la misma operación, hasta acabar con todos los potenciales gateways de la red.

A la hora de calcular el peso que tendría cada nodo, se aplica la siguiente función:

$$W_j = a_j + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N b_{ij} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_{ij} \quad (6)$$

Siendo:

$$a_j = \frac{\text{Batería restante del nodo } j \text{ (GW)}}{100} \quad (7)$$

$$b_{ij} = \frac{\text{Número de vecinos del nodo } i \text{ cuando } j \text{ es el GW}}{\text{Número total de nodos}} \quad (8)$$

$$c_{ij} = 1 - \frac{\text{Número de saltos desde el nodo } i \text{ hasta el } j \text{ cuando } j \text{ es el GW}}{\text{Número máximo de saltos} + 1} \quad (9)$$

Finalmente se elige el gateway de acuerdo a:

$$\text{Máx}(W_j) \quad (10)$$

Como se puede observar, variando los parámetros α , β y γ , puede darse más peso a una característica u otra.

Como aclaración, cabe mencionar que esta última opción supone un incremento considerable en la necesidad de cómputo para seleccionar el próximo Gateway. Por tanto, la mejora en la selección para aumentar la vida útil de la red deberá ser comparada con el gasto resultante del cómputo en los nodos, para determinar si merece la pena optar por esta alternativa frente a la mostrada en la sección 4.4.2.2

4.4.3 Definición de la topología de la red

Una vez elegido el gateway, se procede a la creación de la topología de la red. Para ello, se hace uso del algoritmo de Dijkstra [31], que nos da la mínima distancia desde un nodo elegido a todos los demás vértices (nodos) de la red.

La idea subyacente en este algoritmo consiste en ir explorando todos los caminos directos que parten del vértice origen y que llevan a todos los demás vértices; cuando se obtiene el camino más corto desde el vértice origen, al resto de vértices que componen el grafo, el algoritmo se detiene. El algoritmo está pensado para aristas que posean diferentes pesos y se selecciona el camino de coste mínimo, en este caso todas las aristas tienen el mismo peso así que seleccionar el camino de coste mínimo equivale a seleccionar el camino más corto.

Como resultado de aplicar el algoritmo de Dijkstra obtenemos un árbol con la topología de la red (Figura 4.7), en la que cada nivel se corresponde con la distancia en saltos desde el gateway. Para formar la topología recorreremos el árbol en preorden, esto es, recorreremos la parte izquierda del árbol hasta llegar al último nivel, a partir de ahí subimos y recorreremos la rama inmediatamente a la derecha.

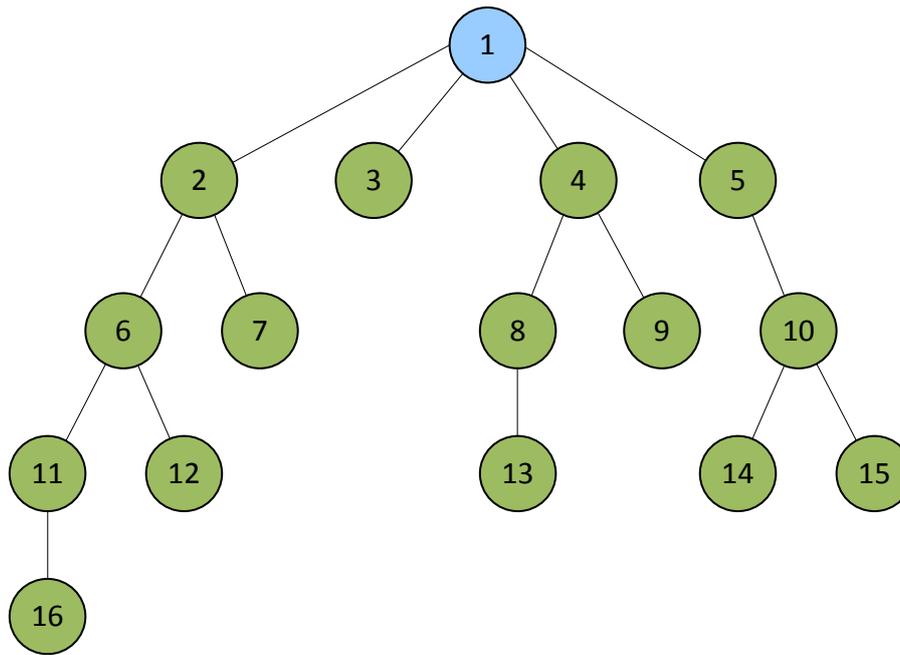


Figura 4.7 – Topología de la red

En este caso el recorrido sería el siguiente:

1-2-6-11-16-11-6-12-6-2-7-1-3-1-4-8-13-8-4-9-4-1-5-10-14-10-15

Una vez obtenida la información de las rutas de la red resultante, el número de saltos desde un nodo hasta cualquier otro y la asignación de niveles, la red está completamente caracterizada y se podrá seguir con el proceso sobre ella.

A continuación, ya que se ha definido AODV como protocolo de enrutamiento, se procederá al descubrimiento de la red tal y como se define, es decir, mediante el envío de paquetes Hello, RREQ y RREP.

4.4.3.1 Envío de mensajes Hello

Una vez formada la topología, se simula el envío de los mensajes Hello, que serían necesarios para formar la red (el proceso previo sirve para que el algoritmo conozca la topología de antemano, y ahora pueda simular el intercambio de paquetes correcto, pero en una situación real serían estos paquetes los que se encargarían de fijar la jerarquía de la red). Se ha supuesto un consumo del 0.03% de la batería por cada mensaje transmitido y 0.01% por cada mensaje recibido.

Cada nodo envía un mensaje Hello en broadcast y recibe tantos mensajes Hello como vecinos tenga, de esta manera todos los nodos de la red añaden en su tabla de rutas a sus vecinos a distancia de un salto.

El formato de los mensajes y un ejemplo de distribución puede verse en la sección 3.4.1.

4.4.3.2 Envío de mensajes RREQ y RREP

Estos mensajes son necesarios para formar todas las rutas posibles. Como las simulaciones se basan en el envío de mensajes de datos por todos los nodos de la red hacia el gateway, por

simplicidad, se hace el descubrimiento de todas las rutas a la vez y no cada vez que un nodo quiera enviar un mensaje. A continuación, en la Figura 4.8, se muestra un diagrama de flujo del proceso de descubrimiento de rutas.

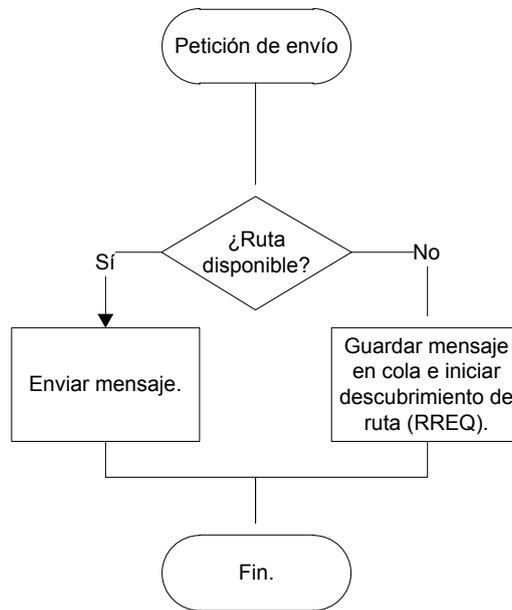


Figura 4.8 - Diagrama de flujo del descubrimiento de rutas

El consumo de batería al enviar estos mensajes es similar, un 0.03% de gasto de batería por cada mensaje enviado y 0.01% por cada mensaje recibido.

En la Figura 4.9 se muestra el intercambio de mensajes RREQ y RREP cuando un nodo situado en el nivel 3 (3 saltos de separación al Gateway) quiere enviar un mensaje al gateway de la red (nivel 0).

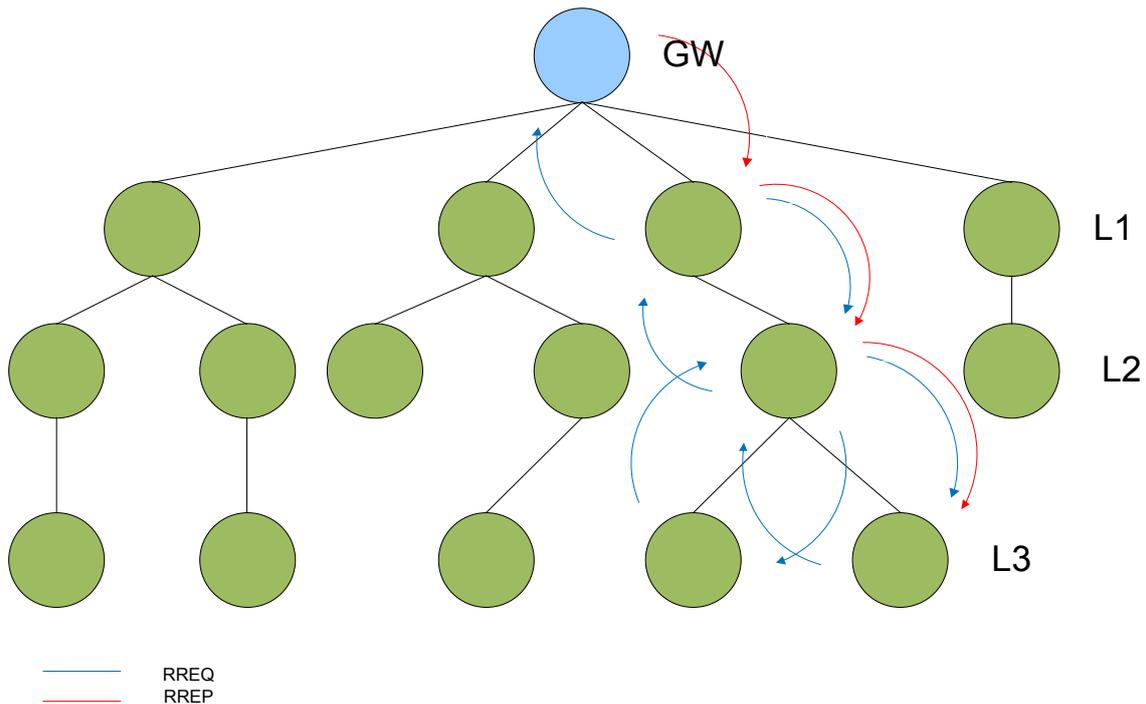


Figura 4.9 – Intercambio de mensajes RREQ y RREP

El formato de los mensajes y un ejemplo de distribución puede verse en la sección 3.4.1.

4.4.4 Envío de mensajes de datos

Una vez conocidas todas las rutas desde cada nodo de la red hasta el gateway se procede al envío de los mensajes de datos.

Se ha supuesto que el envío de mensajes no es distribuido, es decir, que puede haber nodos que envíen más de un mensaje seguido. Para ello, se ha definido un parámetro para cada nodo de la red que indica el número de mensajes de datos seguidos que envía, este parámetro varía de 1 a 19. La introducción de este parámetro sirve para simular la periodicidad en el envío de mensajes. Según la posición de cada nodo, puede ser crítico el hecho de enviar un mensaje cada más o menos tiempo, ya sea por requerimientos de tiempo real o cuestiones de batería.

Como la topología de la red ya se ha formado, cada vez que un nodo genera un mensaje se lo transmite a su padre del nivel superior y éste a su vez se lo retransmite a su padre, así hasta llegar al gateway. El gateway está conectado por alguna tecnología celular (GPRS, 3G, LTE) a la Core Network (CN o red troncal, sobre la que se sustenta Internet), así que simplemente envía el mensaje, y éste será recibido por el servidor de aplicación correspondiente.

Al igual que en anteriores ocasiones, el consumo por cada mensaje de datos enviado en la red celular es del 0.03% de batería y del 0.01% para cada mensaje recibido. Además, el mensaje enviado por el gateway a la red celular se ha supuesto que consume un 0.105% de su batería, ya que requiere el uso de un módulo radio adicional y, generalmente, con mayor demanda de consumo que los de las redes capilares.

4.4.5 Reconfiguración

El sistema debe estar continuamente monitorizando varios parámetros críticos, de modo que se pueda lanzar una reconfiguración y balancear la carga que supone actuar como Gateway de la red capilar.

Los nodos envían mensajes de datos continuamente (una vez en estado normal, con la red creada y jerarquizada), siempre que no ocurra alguno de los dos siguientes eventos:

- Un nodo se queda sin batería (no tiene por qué ser el Gateway). En tal caso, ese nodo se borra de la lista de nodos activos antes de la siguiente reconfiguración.
- La batería del gateway baja de un cierto nivel (configurable)

Cuando alguno de los dos eventos ocurre, se dispara un proceso de reconfiguración, y se vuelve al estado inicial, aquél en el que es necesario elegir un nuevo Gateway.

Hay situaciones especialmente críticas que pueden darse tras el disparo de uno de los anteriores eventos. Por ejemplo, puede darse el caso de que el nodo que ha agotado su batería deje aislados a otros nodos vecinos debido a que sea su único enlace con el resto de la red. Se ilustra esta situación con la Figura 4.10.

El nodo número 6 (marcado en rojo) se queda sin batería y se dispara el proceso de reconfiguración. Suponiendo que se vuelva a elegir el mismo gateway, ahora los nodos 11, 12 y 16 (marcados en naranja) se quedarán fuera de la red y nunca más volverán a formar parte de ella.

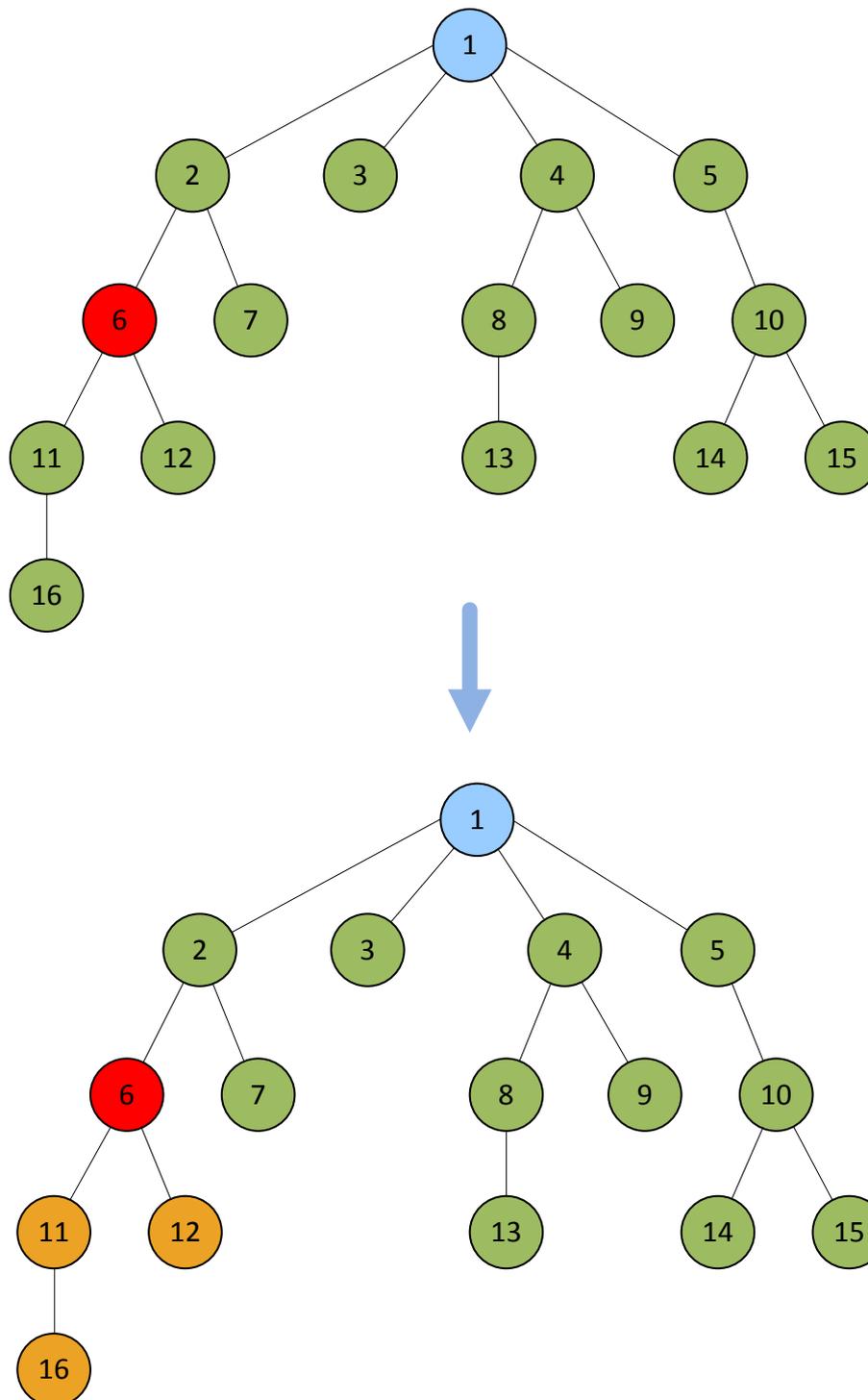


Figura 4.10 – Nodos aislados debido al agotamiento de la batería

El algoritmo diseñado para lanzar las reconfiguraciones, así como las funciones de peso, tratan de acotar al máximo estas potenciales situaciones poco ventajosas, determinando nodos estratégicos y procurando reservarlos en la medida de lo posible.

4.5 Diagrama de bloques del simulador

A la vista de toda la información detallada respecto a configuraciones, entidades, funcionalidades y operaciones del simulador, la Figura 4.11 se muestra como un modo de

condensar todo lo anteriormente explicado de forma visual y ordenada, mostrando todos los procesos y estados por los que pasa el sistema y las relaciones existentes entre ellos.

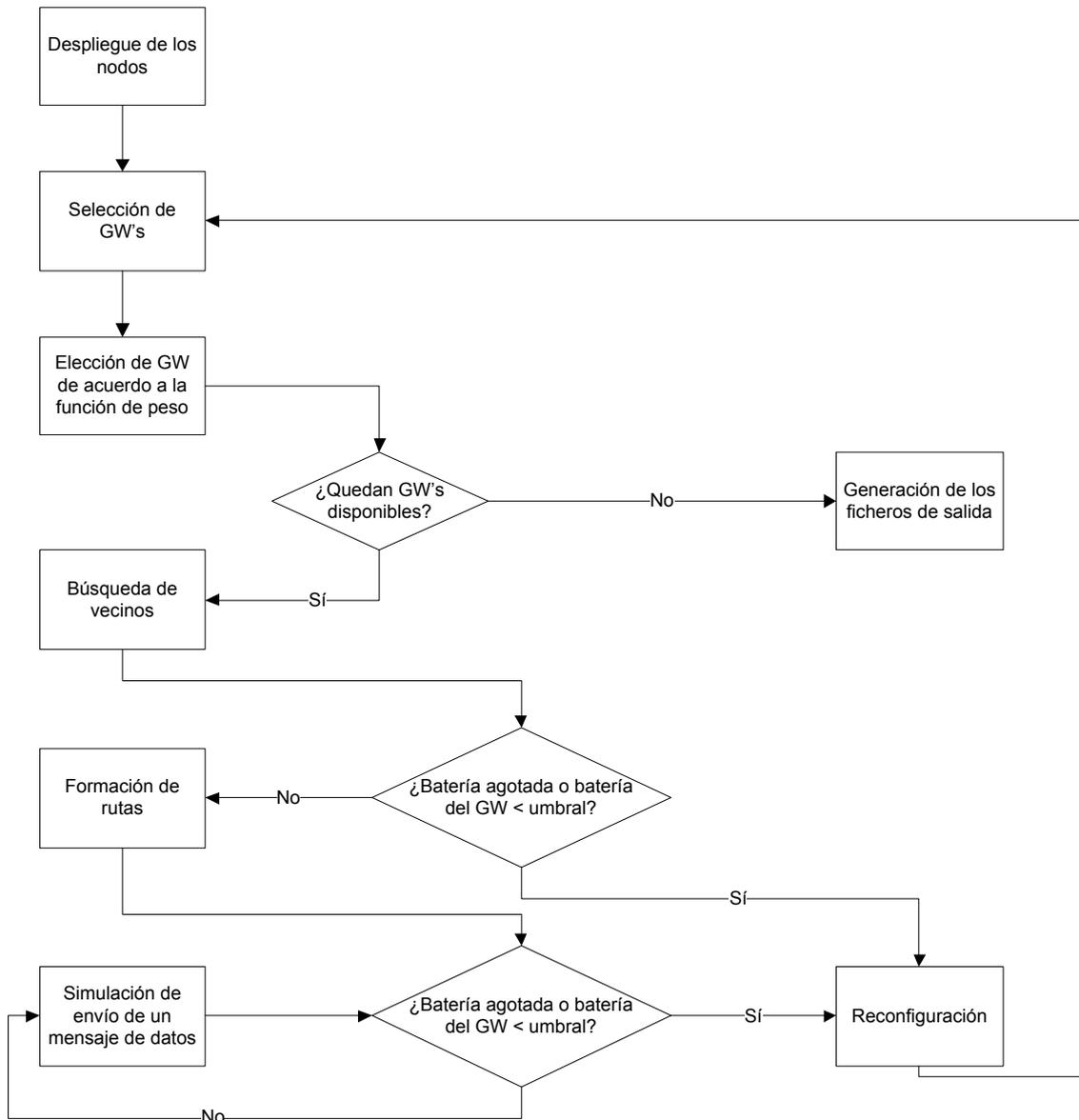


Figura 4.11 – Diagrama de bloques del simulador

Una vez caracterizado de forma completa el simulador, sus bases de funcionamiento, sus requerimientos y supuestos, sus bloques involucrados y las entidades sobre las que actúa, se está en disposición de pasar a la parte de muestra y evaluación de resultados obtenidos sobre esta base.

5 Resultados

Una vez presentadas las principales características tanto del protocolo implementado como del simulador desarrollado, en esta sección se presentarán y analizarán los resultados obtenidos. Para el análisis crítico de los beneficios introducidos por cada una de las propuestas evaluadas se han seleccionado diferentes parámetros como claves para poder extraer conclusiones. Los parámetros críticos de los escenarios evaluados son:

- Número de mensajes de datos enviados.
- Número de nodos que se quedan fuera de la red con batería por reconfiguración.
- Número de nodos aislados.
- Función densidad de probabilidad acumulada de los nodos que se quedan sin batería frente al número de mensajes enviados.
- Mapas de temperatura de los mensajes enviados por cada nodo a lo largo de la simulación.

5.1 Procedimiento de medida

El procedimiento de medida seguido para la obtención de los resultados está basado en la repetición de simulaciones, lo que se conoce como método *Monte Carlo*, de esta manera conseguimos suavizar los posibles picos que aparezcan en alguna de las simulaciones.

Más concretamente la estructura del proceso de simulación se muestra en la Figura 5.1.

El simulador desarrollado tiene numerosos parámetros de entrada, para modificar todos estos parámetros de entrada se decidió crear un script de PERL [32] para ir variando los mismos.

PERL es un lenguaje de programación que toma características del lenguaje C, del lenguaje interpretado bourne shell (sh) [33], AWK [34], sed [35], Lisp [36] ,y, en un grado inferior, de muchos otros lenguajes de programación.

Estructuralmente, PERL es un lenguaje de programación que está basado en un estilo de bloques como los del C o AWK, y fue ampliamente adoptado por su destreza en el procesado de texto y no tener ninguna de las limitaciones de los otros lenguajes de script.

PERL pone a disposición un conjunto bastante rico de variables especiales, o sea variables gestionadas directamente por el intérprete que contienen parámetros muy útiles.

Por todo lo anteriormente citado, la creación de un script PERL como forma de pasar los parámetros de entrada se presenta como una opción fácil y directa.

5.1.1 Script de PERL

Se ha creado un script en PERL para facilitar la ejecución repetida del simulador, de esta manera se consigue variar los parámetros de entrada del simulador y repetir varias simulaciones sin preocuparse de realizar cambios en el código ni de volver a compilar. El script simplemente modifica el fichero de configuración del simulador y lo ejecuta.

El script desarrollado permite definir el número de simulaciones a realizar y va modificando el número de gateways en la red para los diferentes escenarios, de esta manera tenemos numerosas combinaciones posibles.

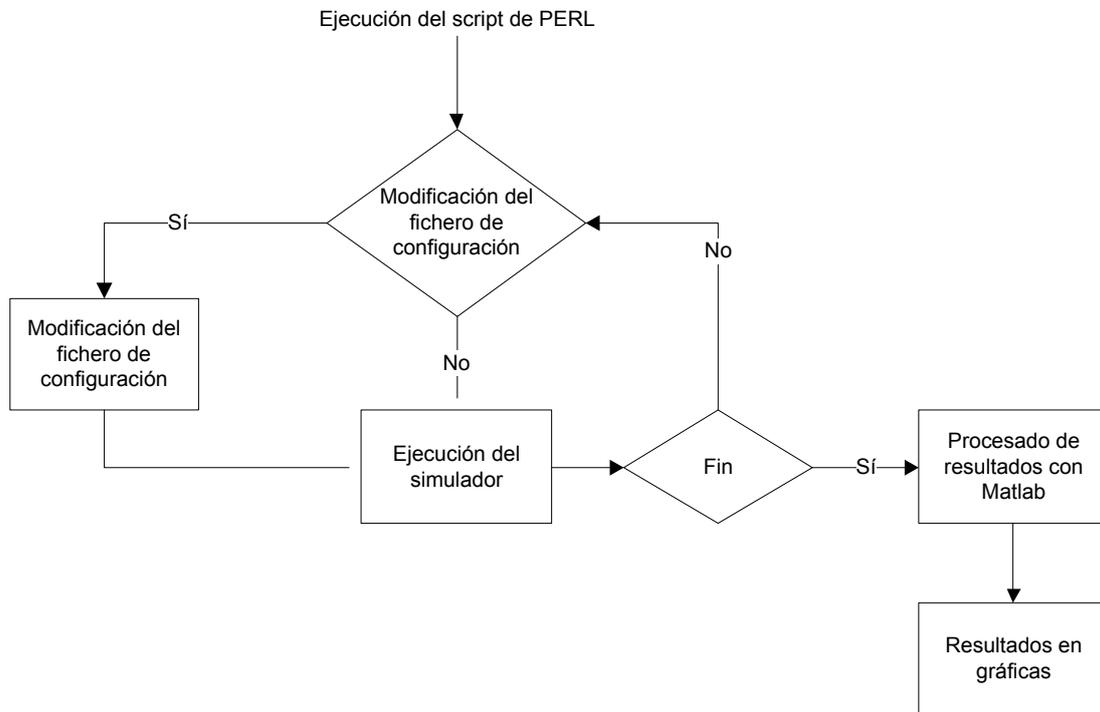


Figura 5.1 – Diagrama de bloques del proceso de simulación

En primer lugar se ejecuta el script de PERL y se comprueba si hay que realizar alguna modificación en el fichero de configuración, si es así se realiza y se ejecuta el simulador. Una vez acaba la simulación se chequea si era la última, si no es así se vuelve a comprobar si hay que modificar el fichero de configuración o simplemente se trata de otra simulación con los mismos parámetros que la anterior. Una vez que todas las simulaciones han terminado se procesa el fichero de datos obtenido con Matlab y se presentan las gráficas.

Los resultados se van escribiendo en un fichero de salida cada vez que termina una simulación, es decir, no se escriben todos al final. Matlab se encarga de leer el fichero y procesar los datos (básicamente promediar los resultados y pintar las gráficas).

5.2 Parámetros globales

El escenario de simulación creado queda definido por una serie de parámetros globales. Éstos son; dimensiones del escenario de simulación, número total de nodos, radio de cobertura de los nodos, población de gateways en la red y el tipo de despliegue de nodos y método de asignación de roles. A continuación se justificará la elección de los mismos.

Se ha elegido una rejilla cuadrada de 300x300, un despliegue de 225 nodos cada uno con un radio de cobertura de 25. Estos valores se han elegido después de haber probado con diferentes combinaciones, y los valores elegidos simulan un escenario lo más realista posible. Con esas dimensiones de rejilla y con ese número de nodos tenemos una densidad de 0.025 nodos/m², un valor típico en este tipo de despliegues. Si los nodos se distribuyesen uniformemente cada nodo cubriría aproximadamente un 2.2% del área total, ya que:

Si cada nodo tiene un radio de cobertura de 25, el área cubierta por un nodo sería:

$$\pi * 25^2 = 1963.5 \text{ u}^2$$

La rejilla tiene un área de:

$$300 * 300 = 90000 \text{ u}^2$$

Así que cada nodo cubre:

$$\frac{1963.5}{90000} * 100 = 2.2\% \text{ del área total}$$

Hay que recordar que esto es en el caso de que los nodos estuvieran distribuidos uniformemente en la rejilla.

5.3 Casos estudiados

Para poder contrastar las ventajas de la propuesta realizada es necesario evaluar diferentes despliegues de nodos en el simulador., comparando las prestaciones que ofrece cada una de las políticas presentadas previamente. A continuación explicaremos los diferentes escenarios que se han estudiado, en cada uno de ellos se han estudiado las tres funciones de peso propuestas, los parámetros que se han variado a lo largo de las simulaciones han sido: la densidad de gateways en la red, el número máximo de saltos, el umbral de reconfiguración y el peso asignado a cada uno de los parámetros de la segunda función de peso.

Despliegue de nodos en la red

- Despliegue aleatorio de los nodos, en este caso la posición de cada elemento en la simulación no es controlable por ninguna entidad del simulador.
- Despliegue uniforme de los nodos, la posición de cada nodo ha sido elegida tras un minucioso estudio de las características del escenario. Con este tipo de despliegues se asegura la maximización del área cubierto por la red.

Selección de gateways

- Elección aleatoria de los gateways. Al elegir esta opción la asignación de roles de cada elemento dentro de la red se realiza de forma no programada. Es decir, el azar establece qué nodos actúan como Gateway y cuáles no.
- Elección óptima de los gateways. Para elegir a los mejores candidatos para realizar las funciones de Gateway se realiza un preprocesado de las características del escenario y se eligen a aquellos que potencialmente presenten mejores condiciones para desempeñar esa tarea.

Variación de la población de gateways en la red

En este estudio, uno de los principales objetivos es estudiar el impacto de la inclusión de diferentes cantidades de nodos que desempeñen esa labor. El coste por dispositivo es notablemente diferente y la optimización de este parámetro puede provocar grandes ahorros en despliegues a gran escala. Los casos evaluados han sido:

- 10% de gateways.
- 20% de gateways.
- 40% de gateways.
- 60% de gateways
- 80% de gateways.
- 100% de gateways.

Funciones de peso para la selección del Gateway

Como se explicó en secciones anteriores, son tres las funciones de peso que han sido implementadas en el simulador. Para todas ellas se estudiarán los escenarios derivados de la combinación de los parámetros anteriores.

5.3.1 Evaluación del impacto del número máximo de saltos permitidos en la red

El primer estudio que se muestra busca conocer la reacción de la red frente a la variación del número máximo de saltos permitidos. Es previsible que el uso de un mayor número de saltos permita obtener grandes áreas cubiertas, sin embargo, el consumo energético será mucho mayor. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

En la primera tanda de simulaciones se compara el número máximo de saltos. El primer grupo de figuras muestra los cuatro escenarios posibles (varia el despliegue y la selección de gateways) agrupados por la función de peso para la elección del gateway. Los diferentes escenarios que se muestran son (empezando de izquierda a derecha y de arriba abajo):

- UU: Despliegue uniforme de los nodos, selección óptima de gateways.
- UR: Despliegue uniforme de los nodos, selección aleatoria de los gateways.
- RU: Despliegue aleatorio de los nodos, selección óptima de los gateways.
- RR: Despliegue aleatorio de los nodos, selección aleatoria de los gateways.

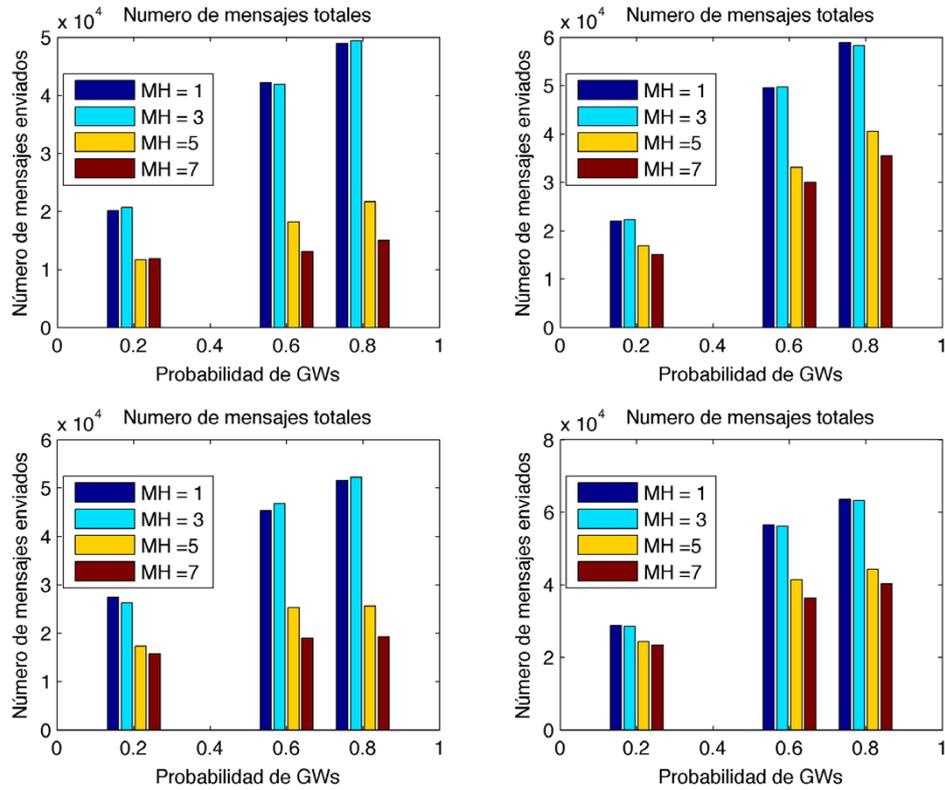


Figura 5.2 – Número de mensajes de datos enviados en función del número de saltos. Función de peso aleatoria

En esta primera figura (Figura 5.2) la elección del gateway entre todos los posibles se realiza de forma aleatoria.

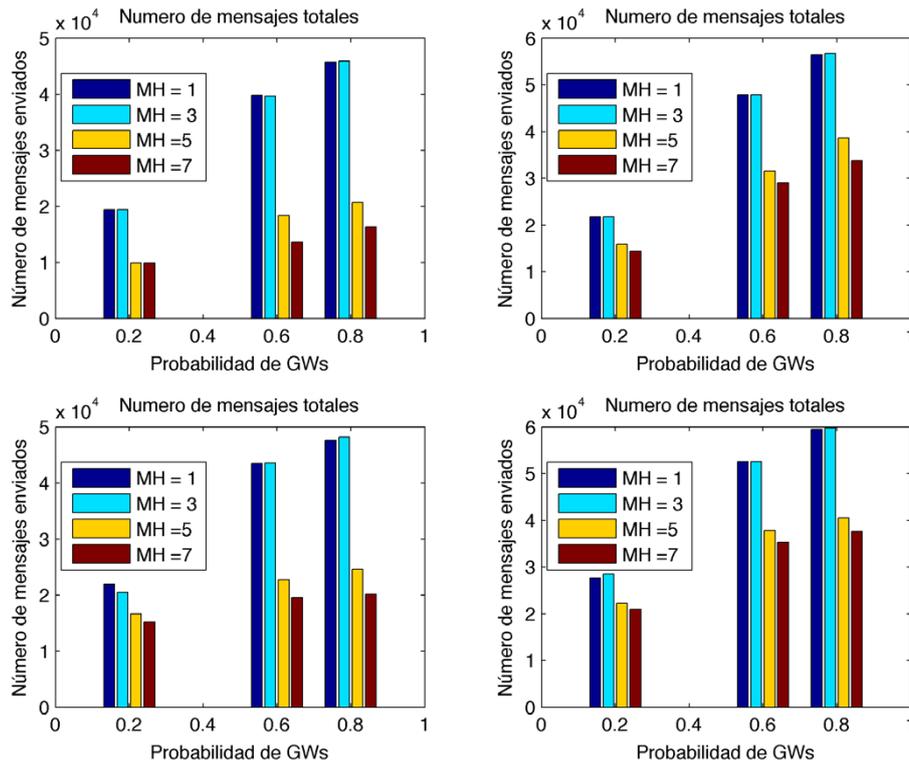


Figura 5.3 - Número de mensajes de datos enviados en función del número de saltos. Función de peso lineal

En la figura superior (Figura 5.3) la elección del gateway se realiza de acuerdo a la función de peso lineal, en la que se tiene en cuenta la batería y el número de vecinos de cada posible gateway.

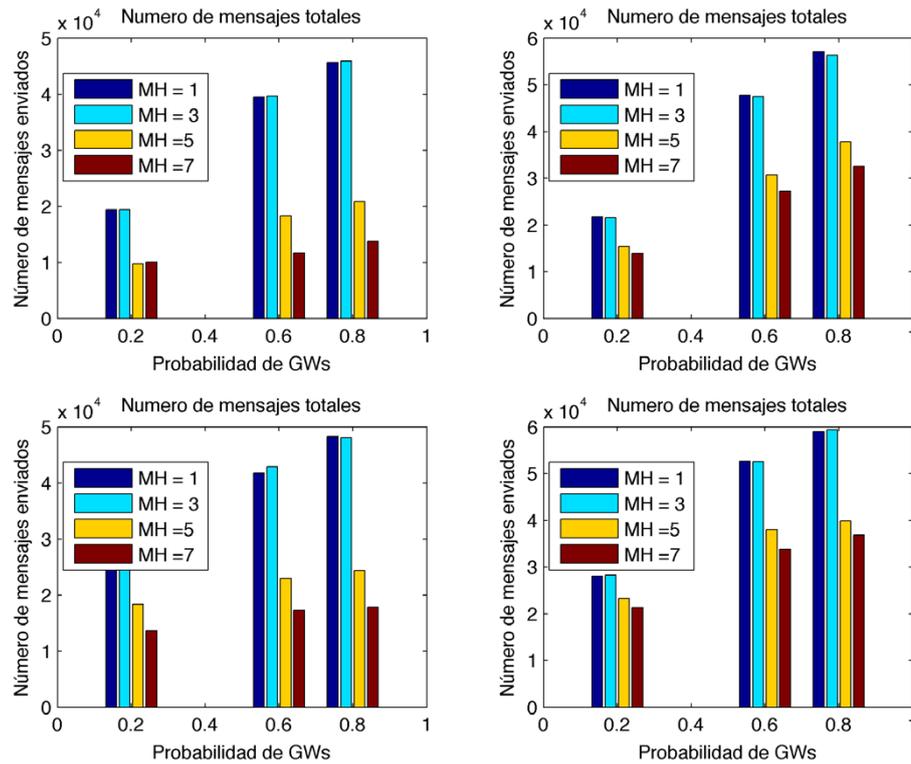


Figura 5.4 - Número de mensajes de datos enviados en función del número de saltos. Segunda función de peso

En esta última figura (Figura 5.4) refleja los resultados obtenidos en el caso de utilizar la segunda función de peso para la selección del nodo que actuará como agregador de tráfico.

Como se puede observar en las figuras anteriores, los resultados están separados por probabilidad de gateways en la red y para cada uno de los casos tenemos un número de saltos de 1, 3, 5 y 7. A mayor número de gateways en la red crece el número de mensajes enviados, pues tenemos más nodos que pueden ser elegidos como gateway para formar la red. Con un número bajo de gateways cuando se agoten sus baterías no se podrá formar la red. Partiendo de esta premisa, se hace necesario evaluar el impacto del número máximo de saltos que se permiten en la red. En la figura se observa como se envían más mensajes para el caso de 1 y 3 saltos, esto es debido a que se forman redes más pequeñas (menor distancia al gateway), por lo tanto los nodos intermedios están más cerca del gateway y tienen que reenviar menos mensajes con el consiguiente ahorro de batería. Para un número de saltos elevado (5 y 7) el número de mensajes desciende drásticamente, esto es debido a que los nodos intermedios están distanciados varios saltos del gateway y tanto en los procesos de descubrimiento de ruta, como en el reenvío de mensajes de nodos más lejanos su actividad será mucho mayor.

Analizando únicamente este parámetro podría asegurar que la mejor opción para la red sería emplear un número pequeño de saltos. No obstante, tendríamos una visión sesgada de la realidad ya que el número máximo de mensajes es un parámetro que no da toda la información necesaria para comprender el funcionamiento de la red, así como tampoco sabríamos de forma fiable que política es la mejor .

En este caso las simulaciones se han centrado en despliegues uniformes de nodos (despliegues conocidos). En las siguientes figuras (Figura 5.5, Figura 5.6 y Figura 5.7) se representa la rejilla completa y en función del número de mensajes enviados por cada nodo la zona adquiere un color más frío (bajo número de mensajes enviados) o más cálido (alto número de mensajes enviados). Primero se analiza el caso de una selección óptima de gateways, por lo tanto al tener un despliegue uniforme de los nodos, se espera que las zonas con gran cantidad de mensajes enviados se concentren en el medio de la rejilla.

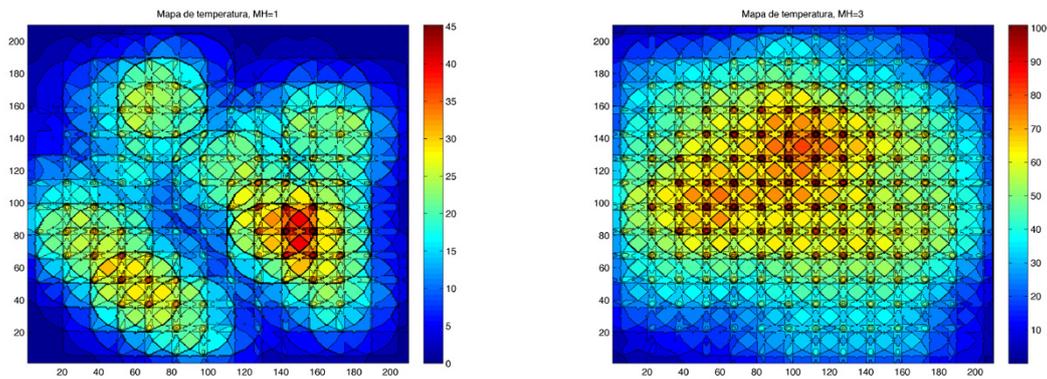


Figura 5.5 - Comparación del mapa de temperaturas para MH=1 y MH=3 con selección uniforme de gateways. Función de peso aleatoria

En la figura de la parte superior (Figura 5.5) se muestra el mapa de temperatura para la función de peso aleatoria.

A continuación se muestra el mapa de temperatura para la función de peso lineal.

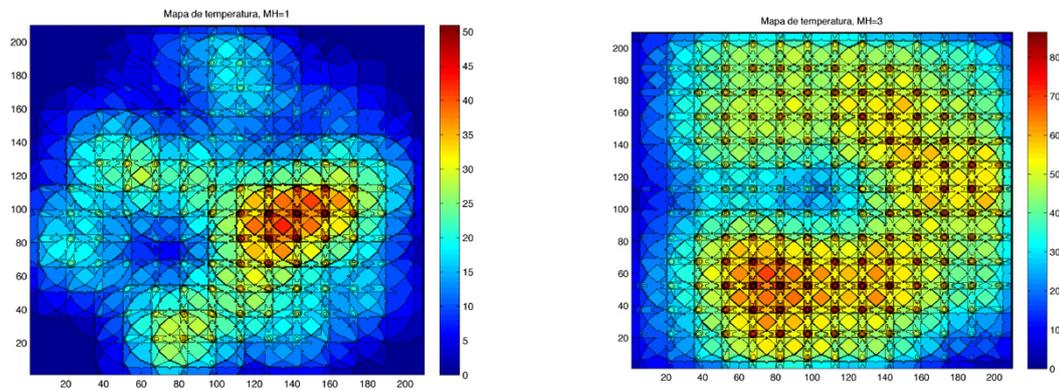


Figura 5.6 – Comparación del mapa de temperaturas para MH=1 y MH=3 con selección uniforme de gateways. Función de peso lineal

Finalmente, se obtiene el siguiente mapa de temperatura para la segunda función de peso.

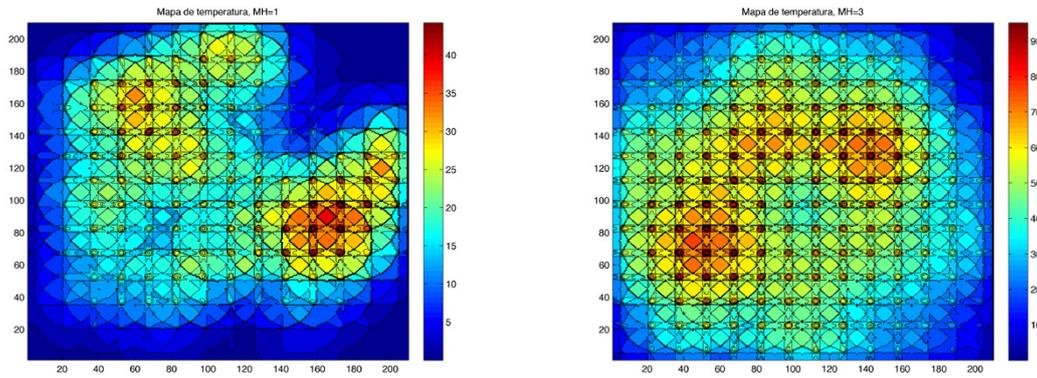


Figura 5.7 - Comparación del mapa de temperaturas para MH=1 y MH=3 con selección uniforme de gateways. Segunda función de peso

Se puede observar cómo fijando el número máximo de saltos a 3 se consigue obtener una cobertura global superior. Con un número de saltos igual a 1 se forman islas pequeñas que cubren una pequeña superficie, en cambio, con la estrategia de 3 saltos se consiguen islas mayores cubriendo así una mayor parte del escenario. Por lo tanto, para este tipo de despliegues es mejor fijar el número de saltos a 3, como se ha visto en términos de mensajes enviados ambas estrategias (1 y 3 saltos) son similares, pero en cuanto a zonas cubiertas es superior la estrategia de 3 saltos.

A continuación mostramos los mismos mapas de temperatura que los anteriores (despliegue uniforme y selección óptima) para un número de saltos de 5 y 7 (Figura 5.8, Figura 5.9 y Figura 5.10).

Primero se muestra la función de peso aleatoria para la selección del gateway.

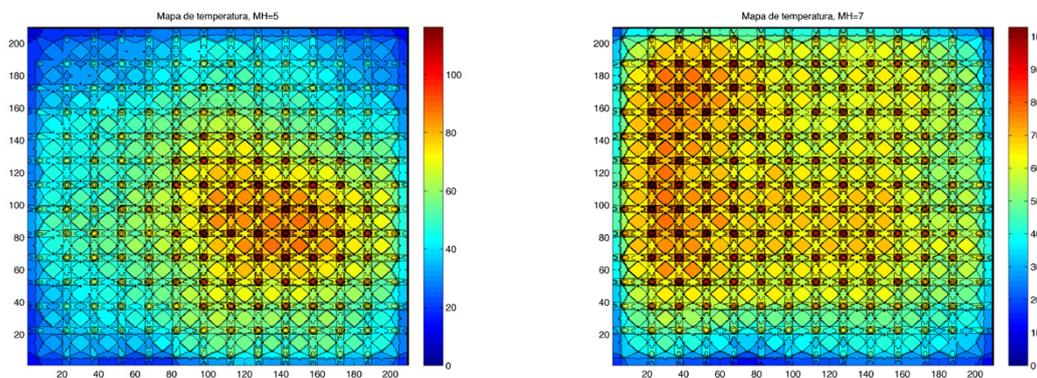


Figura 5.8 - Comparación del mapa de temperaturas para MH=5 y MH=7 con selección uniforme de gateways. Función de peso aleatoria

En la siguiente figura (Figura 5.9) se muestra la función de peso lineal para la elección del gateway.

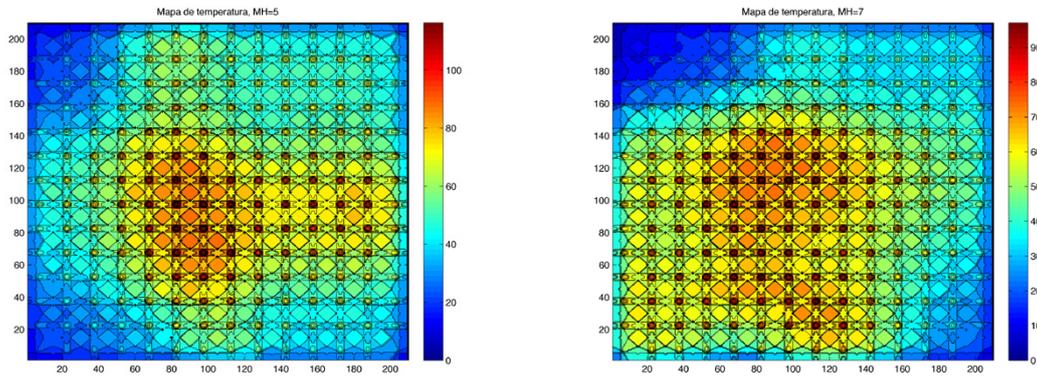


Figura 5.9 - Comparación del mapa de temperaturas para MH=5 y MH=7 con selección uniforme de gateways. Función de peso lineal

Finalmente, en la siguiente figura se muestra la segunda función de peso.

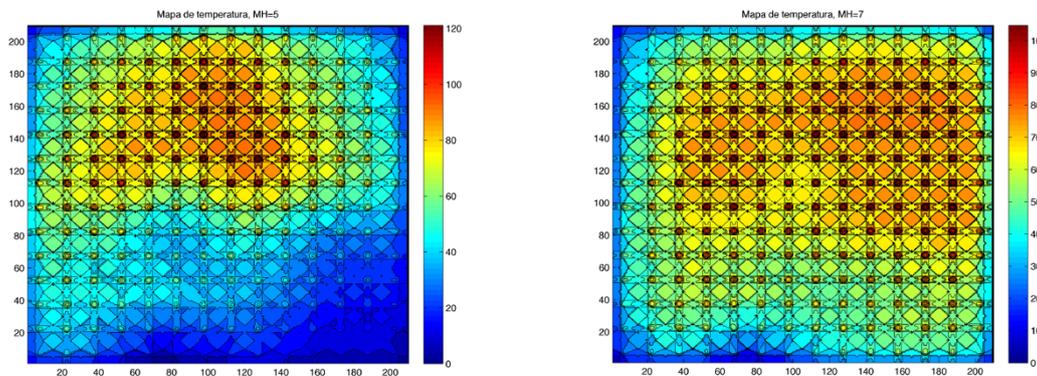


Figura 5.10 - Comparación del mapa de temperaturas para MH=5 y MH=7 con selección uniforme de gateways. Segunda función de peso

En las tres figuras anteriores se ha mostrado el mapa de temperatura para 5 y 7 saltos. A mayor número de saltos se cubre un mayor área de la superficie, por lo tanto se logra una mayor cobertura, pero como se ha visto anteriormente el número de mensajes enviados descendiendo a la vez que aumenta el número de saltos. Por lo tanto, existe un compromiso entre el número de mensajes enviados y la cobertura global. Las estrategias de 3 y 5 saltos han resultado ser las mejores para maximizar estos dos parámetros.

El análisis de cuantas más figuras de mérito de la red posibles permite un análisis mucho más certero del comportamiento que la red tiene en función de las diferentes estrategias definidas. A continuación se realizará una comparación entre las estrategias de saltos (1, 3, 5 y 7) para características como el número de nodos aislados, el número de nodos que se quedan fuera de la red pero que no tienen batería, etc. Se ha realizado la simulación fijando el umbral de reconfiguración al 20%, más adelante se realizará un análisis de los diferentes umbrales de reconfiguración.

Primero se muestra el número de nodos sin batería frente al número de mensajes enviados (Figura 5.11) para los diferentes escenarios (despliegue y selección de gateways) y para las diferentes funciones de selección de gateway (aleatoria, lineal y segunda función de peso). El número de gateways se ha fijado a un 60% de los nodos totales. Se tienen los mismos escenarios que anteriormente se han definido.

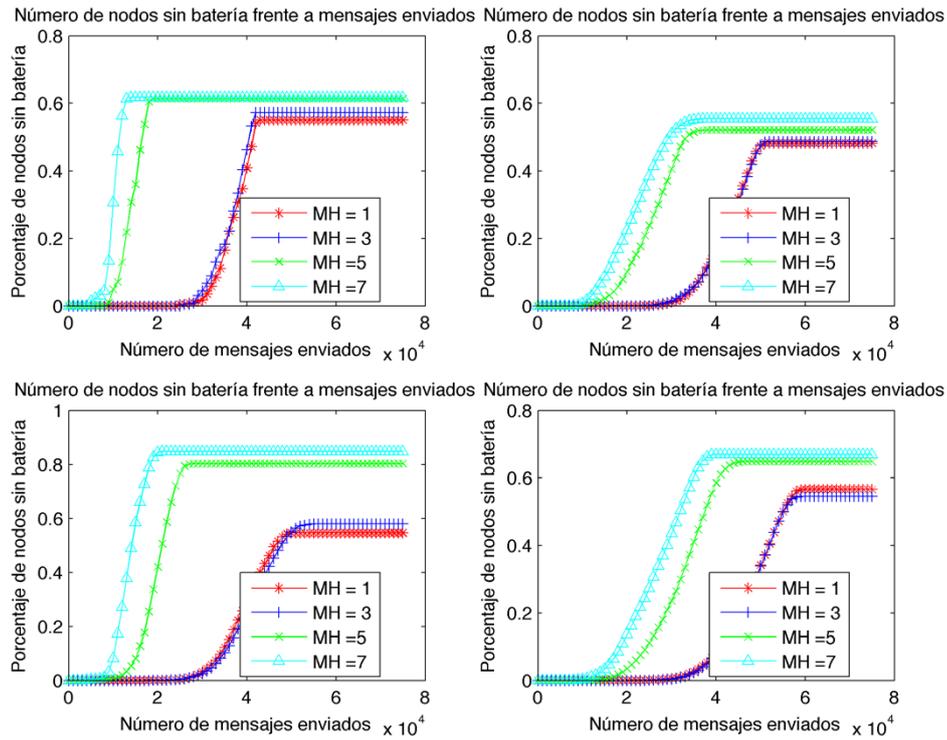


Figura 5.11 – Número de nodos sin batería en función del número de mensajes enviados. Función de peso aleatoria.

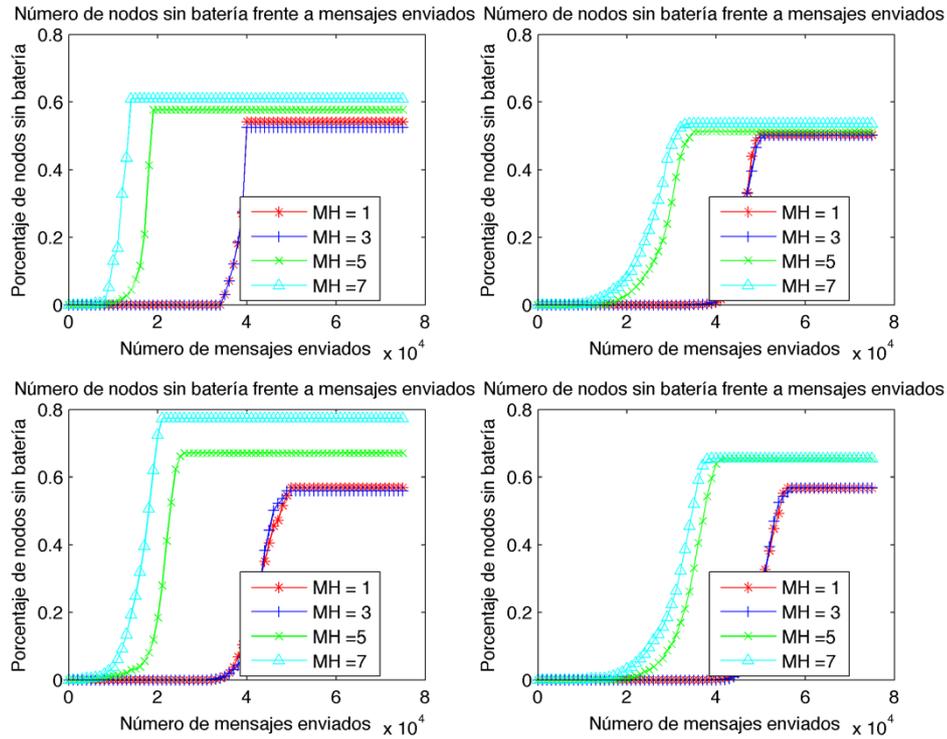


Figura 5.12 - Número de nodos sin batería en función del número de mensajes enviados. Función de peso lineal.

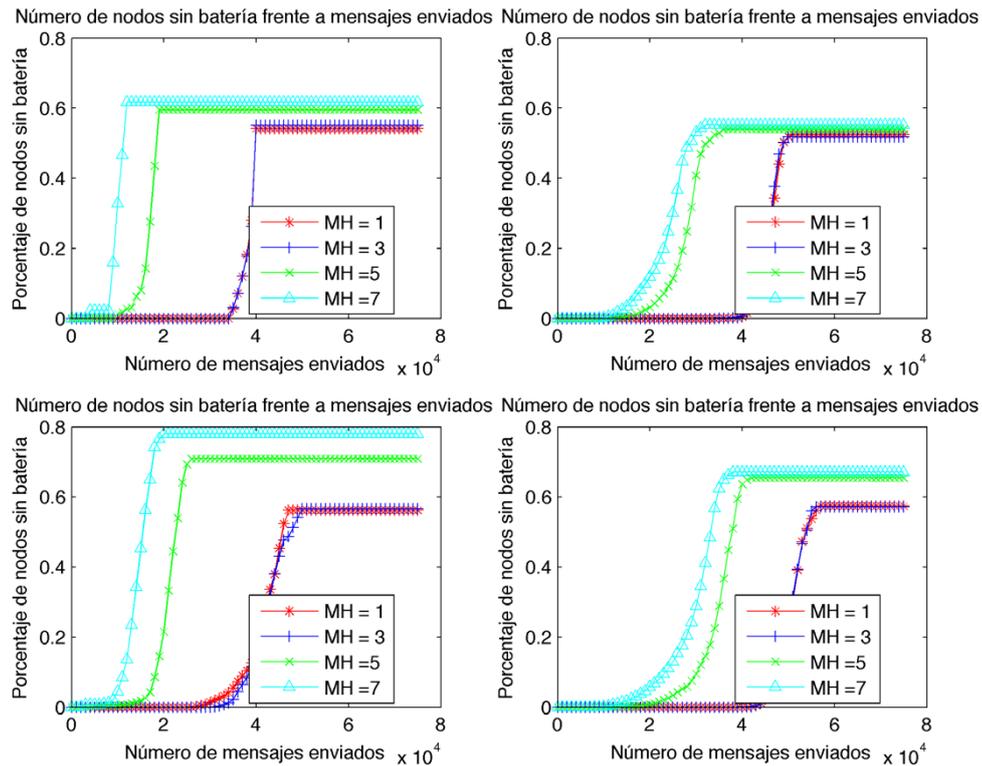


Figura 5.13 - Número de nodos sin batería en función del número de mensajes enviados. Segunda función de peso.

Las gráficas mostradas (Figura 5.11, Figura 5.12 y Figura 5.13) representan la CDF del número de nodos sin batería frente al número de mensajes enviados. Cabe destacar que todas están alrededor del 0.6 al final de la simulación, esto es debido a que existe esa concentración de gateways en la red. Las estrategias de 5 y 7 saltos superan este valor debido a que las redes que se forman son mayores en cuanto a número de saltos y la batería de los dispositivos finales va consumiéndose más rápido que en el caso de 1 y 3 saltos, ya que tienen que encaminar más mensajes hasta llegar al gateway. Es decir, cuando se agota la batería de todos los gateways y no se puede formar la red, existe un mayor número de dispositivos finales sin batería que en el caso de las estrategias de 1 y 3 saltos.

Como se puede observar en las anteriores gráficas, las estrategias de 1 y 3 saltos están muy parejas en cuanto a los resultados. Siendo peores las de 5 y 7 saltos, ya que envían un menor número de mensajes y dejan un mayor número de dispositivos sin batería al final de la simulación.

Para los casos en que el despliegue de los nodos se realiza de forma uniforme, se puede apreciar que según empiezan a quedarse sin batería los primeros nodos, rápidamente se llega al fin de la simulación. Este hecho es debido a que al tener un despliegue uniforme de los nodos en la red la formación de islas es menos probable al principio de la simulación ya que la mayor parte de los nodos formarán parte de la red en un principio, pero a medida que los nodos se quedan sin batería se forma gran parte de la red queda aislada al no poder llegar a ella a través de ningún nodo. Este hecho es más notable en el caso de selección óptima de gateways, ya que se elegirán como posibles gateways aquellos que se encuentren en el centro

de la rejilla y cuando se agote su batería dejarán grandes áreas inaccesibles. Se ilustra esta situación con la siguiente figura (Figura 5.14)

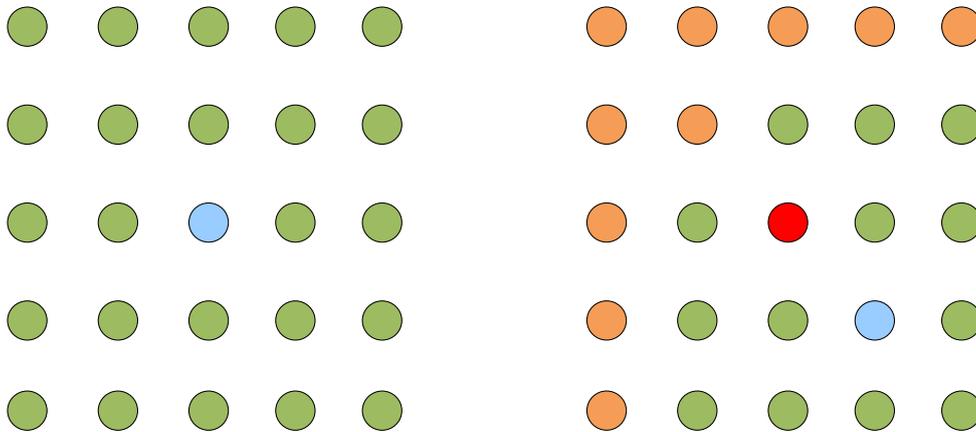


Figura 5.14 –Nodos fuera de la red pero con batería para despliegue uniforme

Suponemos un número máximo de saltos igual a 3 y que un nodo ve a los nodos que estén a lado o en su diagonal. Al principio todos los nodos forman parte de la red.

Cuando el gateway central agote su batería, se seleccionará otro gateway, por ejemplo el mostrado en la parte derecha de la Figura 5.14, pero en este caso 1 nodo se queda fuera de la red aún disponiendo de batería, es inaccesible debido a que el nodo central se ha quedado sin batería.

Teniendo en cuenta todos los resultados hasta el momento, se puede concluir que existe un compromiso entre maximizar la vida útil de las baterías de los nodos, esto es, maximizar el número de mensajes enviados, y cubrir el mayor área posible de cobertura.

La estrategia de 3 saltos es la mejor en estos términos, ya que envía un número de mensajes similar a la estrategia de 1 salto (que es la que más mensajes envía) pero consigue cubrir un mayor área de cobertura como se ha visto en los mapas de temperatura mostrados.

5.3.2 Evaluación del proceso de selección de agregador

En la sección anterior se ha mostrado el estudio del impacto del número máximo de saltos permitidos dentro de la red. El siguiente objetivo es analizar en profundidad las ventajas que cada una de las diferentes estrategias de selección de gateways introduce al sistema. Para ello, los siguientes resultados han sido obtenidos limitando la variación de los parámetros de configuración del simulador.

A continuación se compararán las tres funciones propuestas para la elección del gateway, se hará a través de los mapas de temperaturas con las mismas condiciones de simulación que se han usado para obtener los mapas de temperaturas anteriores, pero en este caso la selección inicial de los gateways se realizará de forma aleatoria, de esta manera nos aseguramos que los gateways podrán distribuirse por toda la rejilla y no en los lugares centrales tal y como ocurría cuando realizábamos la selección óptima.

Se analiza en primer lugar el caso con número de saltos igual a 1. En las siguientes figuras (Figura 5.15, Figura 5.16 y Figura 5.17) se muestran los mapas de temperaturas de cada función.

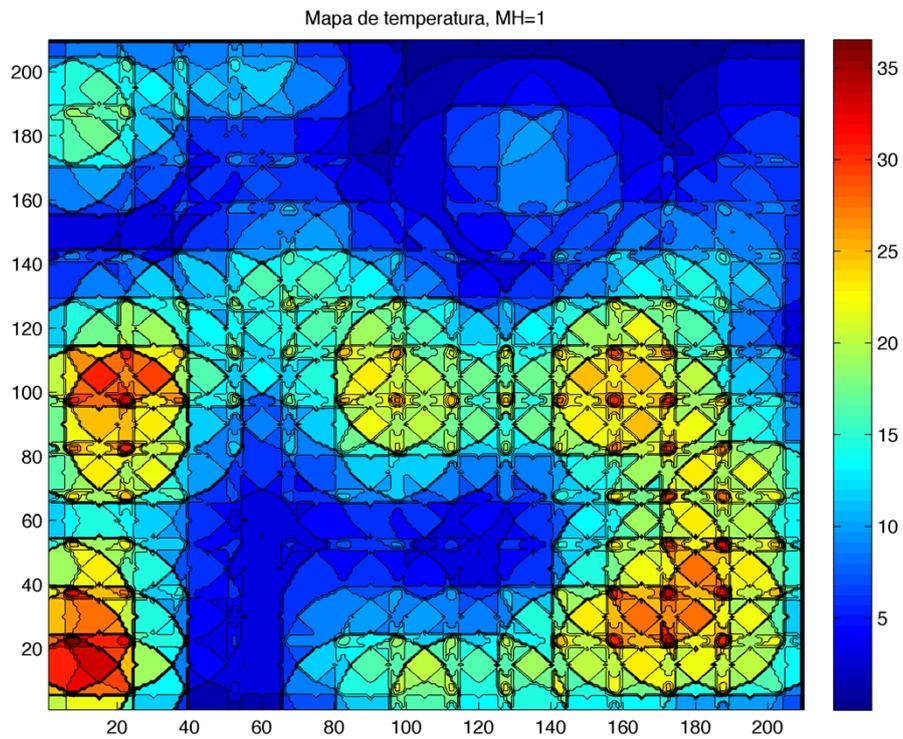


Figura 5.15 – Mapa de temperatura para MH=1 y con selección aleatoria de gateways. Función de peso aleatoria

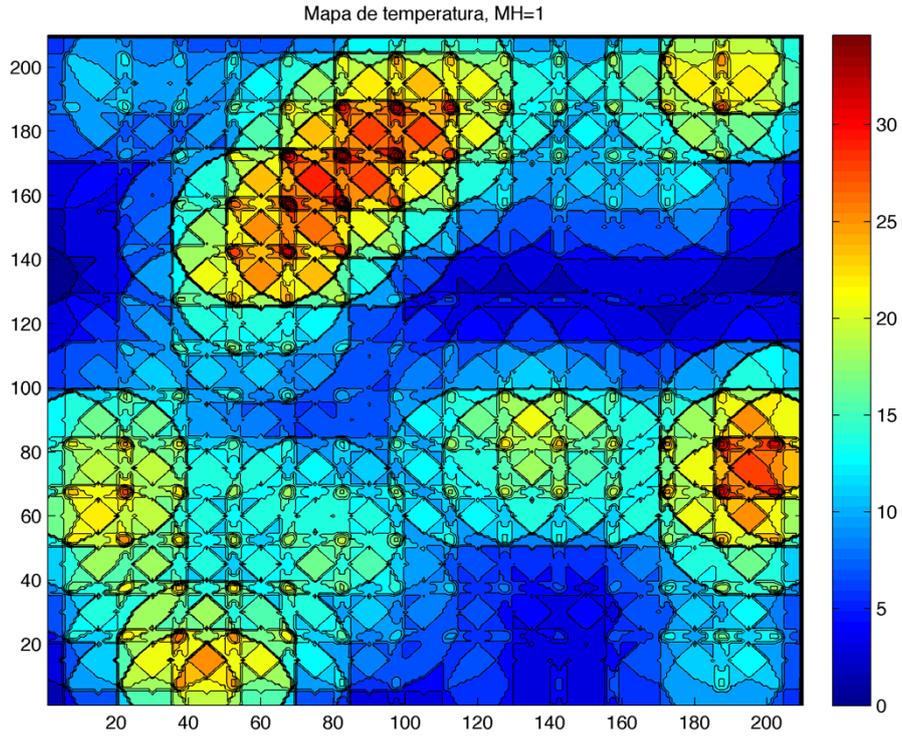


Figura 5.16 - Mapa de temperatura para MH=1 y con selección aleatoria de gateways. Función de peso lineal

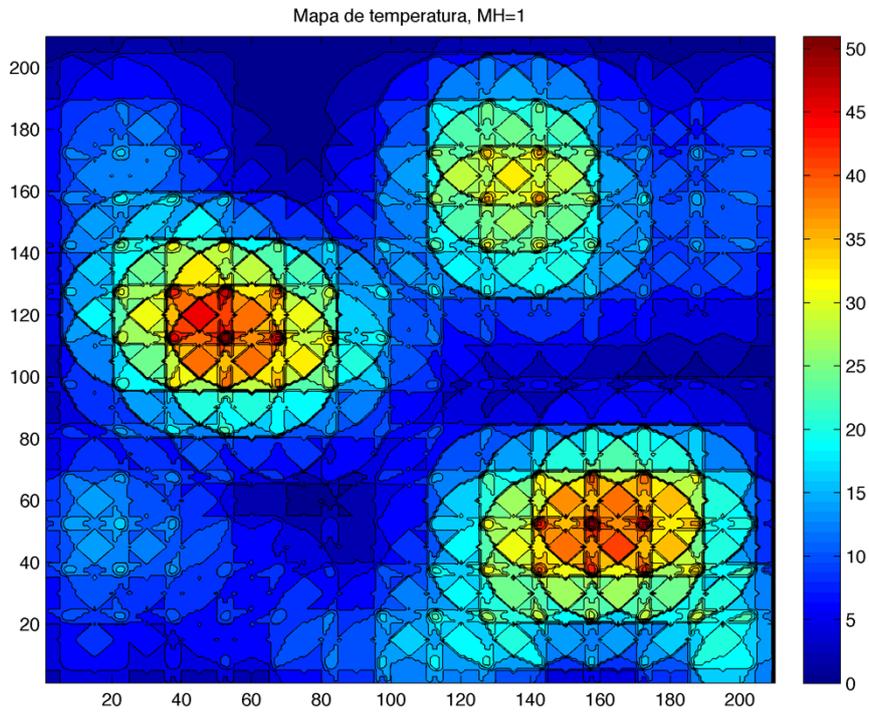


Figura 5.17 - Mapa de temperatura para MH=1 y con selección aleatoria de gateways. Segunda función de peso

Para un número máximo de saltos igual a 1 no existe una gran ganancia en términos de cobertura si comparamos las tres funciones de peso. Esto es debido a que con un número de saltos tan bajo las redes que se forman son muy pequeñas y como la elección de los gateways iniciales se realiza de forma aleatoria, no existe gran diferencia entre usar una función de peso u otra.

Se muestra a continuación el caso para un número máximo de saltos igual a 3 (Figura 5.18, Figura 5.19 y Figura 5.20).

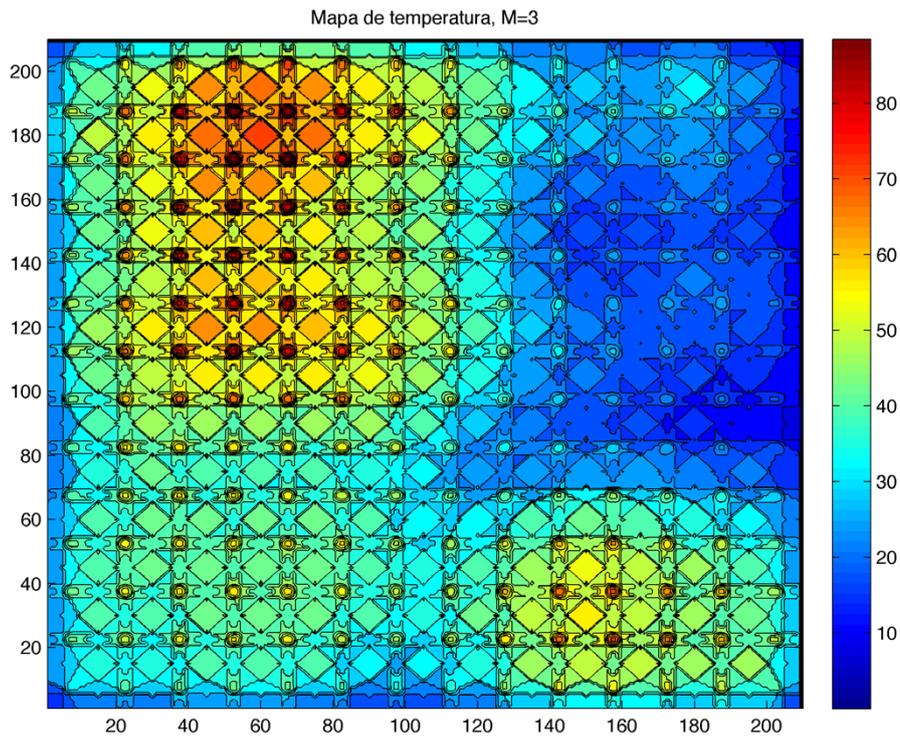


Figura 5.18 - Mapa de temperatura para MH=3 y con selección aleatoria de gateways. Función de peso aleatoria

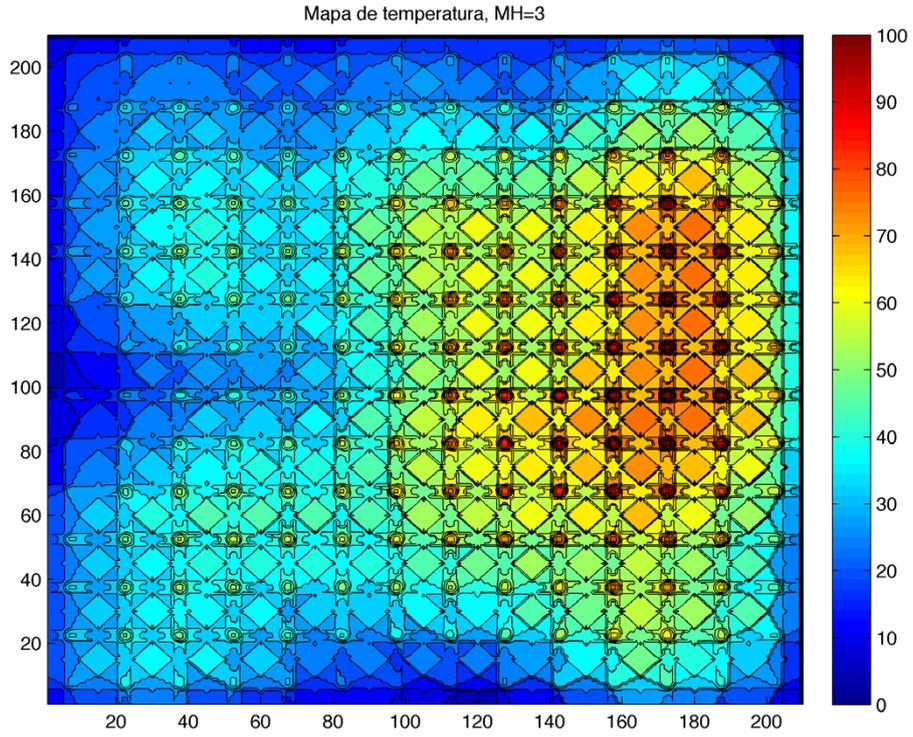


Figura 5.19 - Mapa de temperatura para MH=3 y con selección aleatoria de gateways. Función de peso lineal

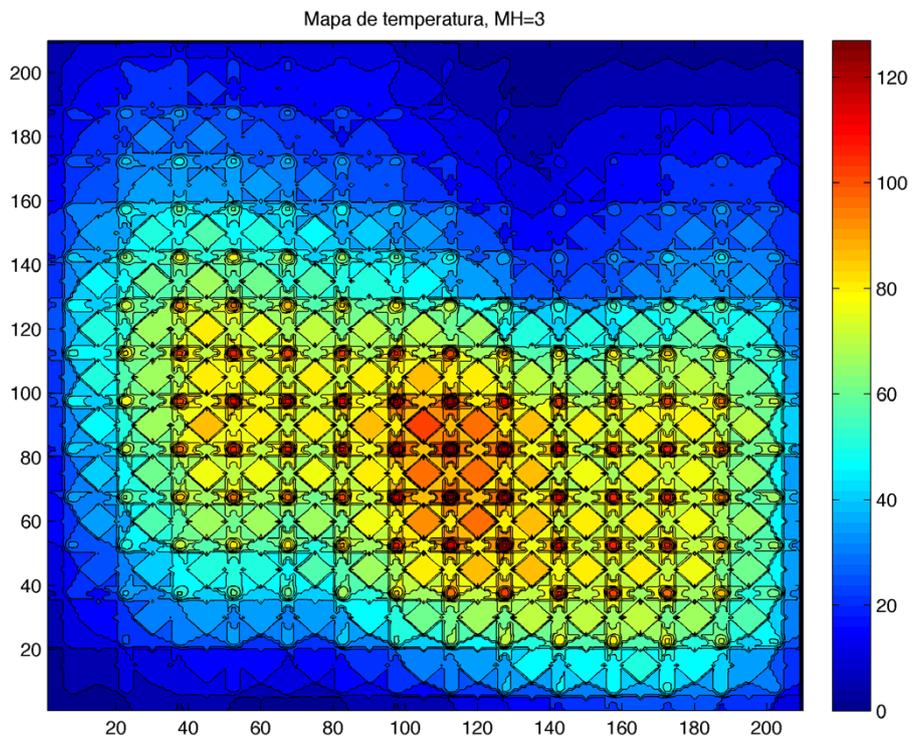


Figura 5.20 - Mapa de temperatura para MH=3 y con selección aleatoria de gateways. Segunda función de peso

En este caso tampoco es apreciable la mejora en cuanto a cobertura global, aunque la escala de colores tiene máximos diferentes, para el caso de la aleatoria sólo llega a 80, mientras que para la segunda función de peso llega a 120. Esto implica que aunque haya más zonas frías (zonas con poca cobertura) en la segunda función de peso que en la aleatoria no quiere decir que esas zonas frías tengan menos cobertura, ya que la escala es diferente.

Se analiza ahora el caso de número máximo de saltos igual a 5 (Figura 5.21, Figura 5.22 y Figura 5.23). En este caso las redes que se forman tienen un mayor tamaño y se apreciará mejor la diferencia entre las tres funciones de peso.

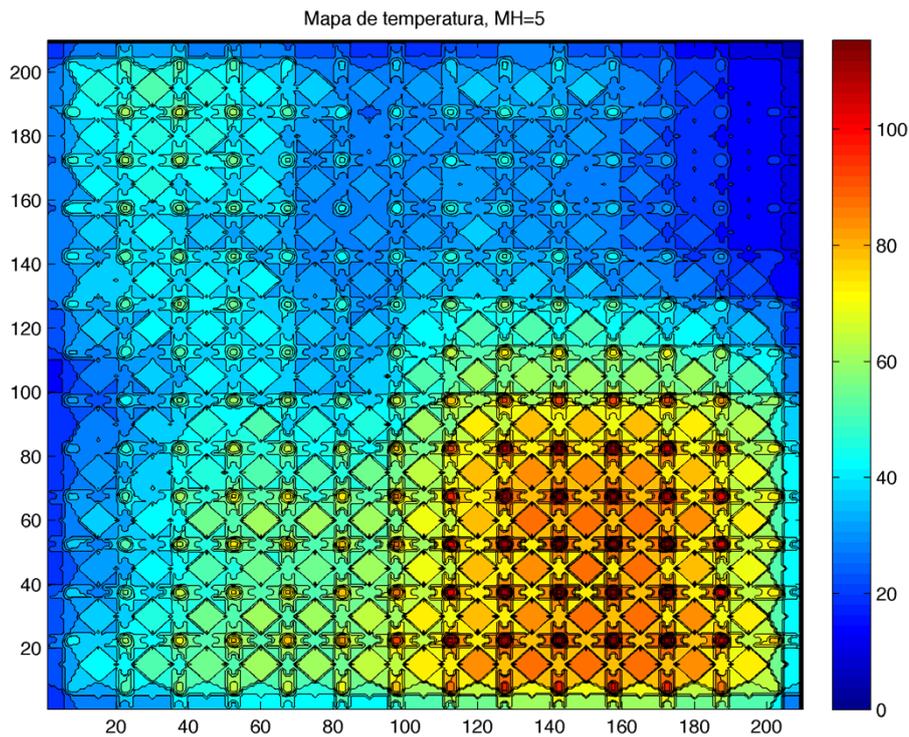


Figura 5.21 - Mapa de temperatura para MH=5 y con selección aleatoria de gateways. Función de peso aleatoria

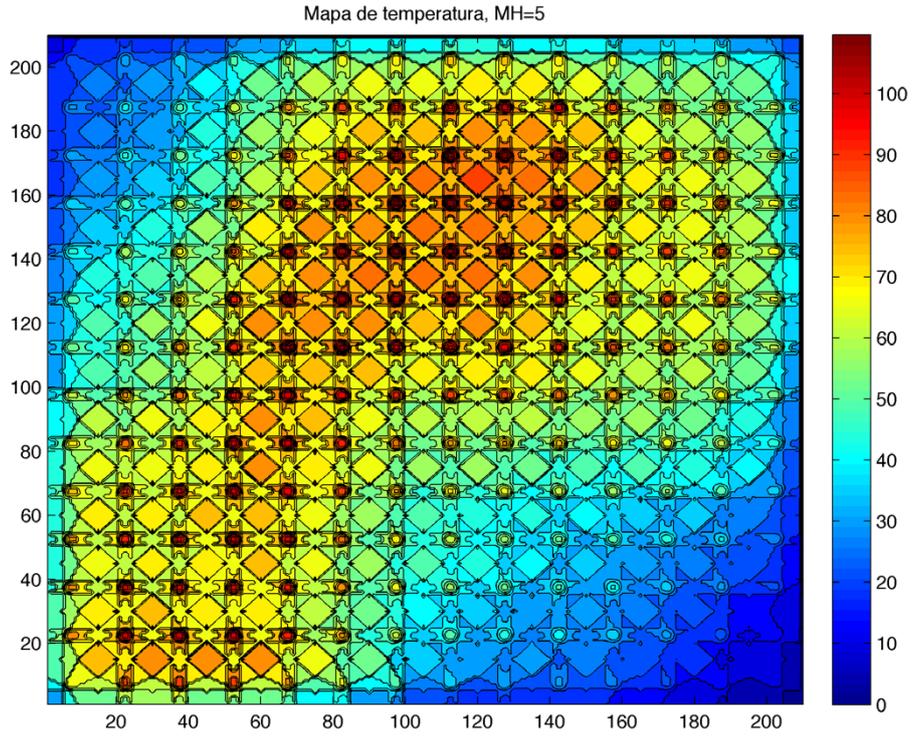


Figura 5.22 - Mapa de temperatura para MH=5 y con selección aleatoria de gateways. Función de peso lineal

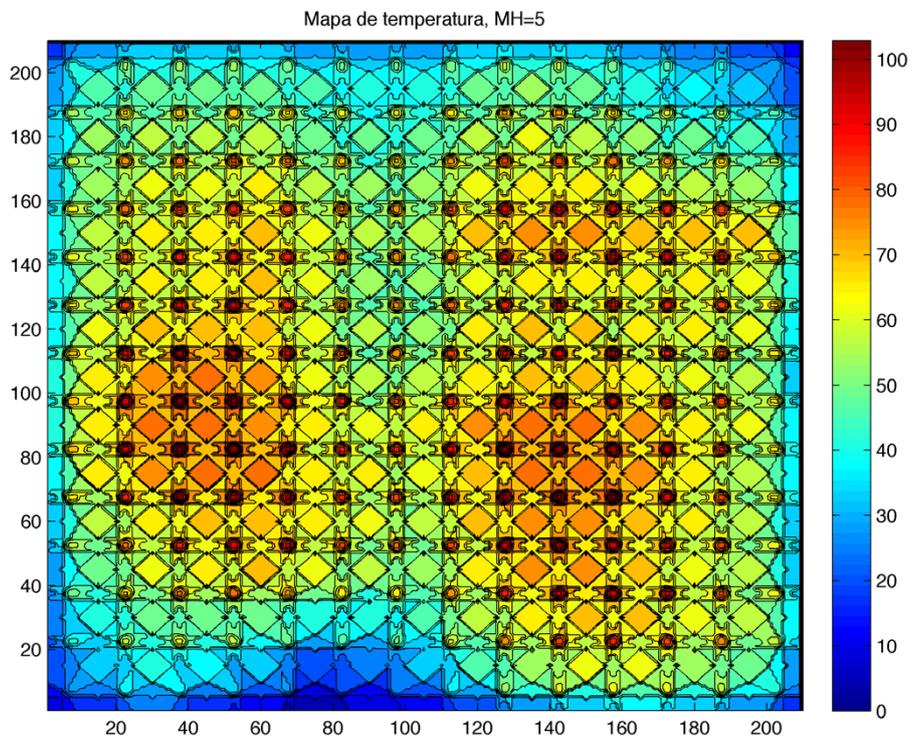


Figura 5.23 - Mapa de temperatura para MH=5 y con selección aleatoria de gateways. Segunda función de peso

En este caso ya se aprecia cómo la segunda función de peso y la función de peso lineal mejoran la cobertura global frente a la función de peso aleatoria. La función de peso aleatoria simplemente escoge un gateway de entre todos los posibles, en cambio, la función de peso lineal y la segunda función de peso tienen en cuenta la batería restante de cada posible gateway y el número de vecinos a la hora de realizar la elección.

Se muestra por último el caso con 7 saltos (Figura 5.24, Figura 5.25 y Figura 5.26).

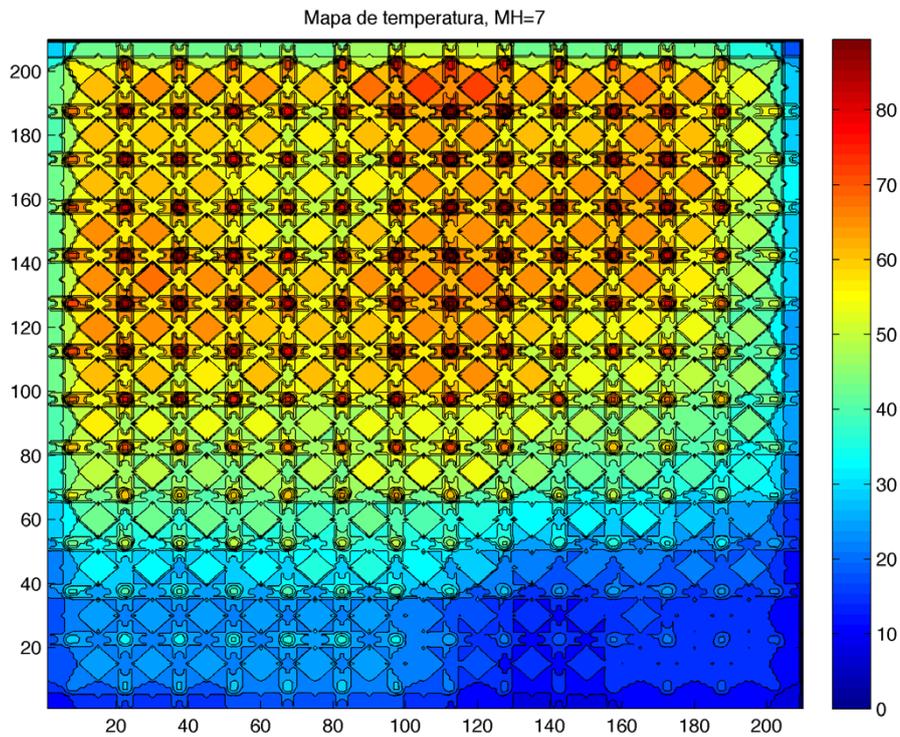


Figura 5.24 - Mapa de temperatura para MH=7 y con selección aleatoria de gateways. Función de peso aleatoria

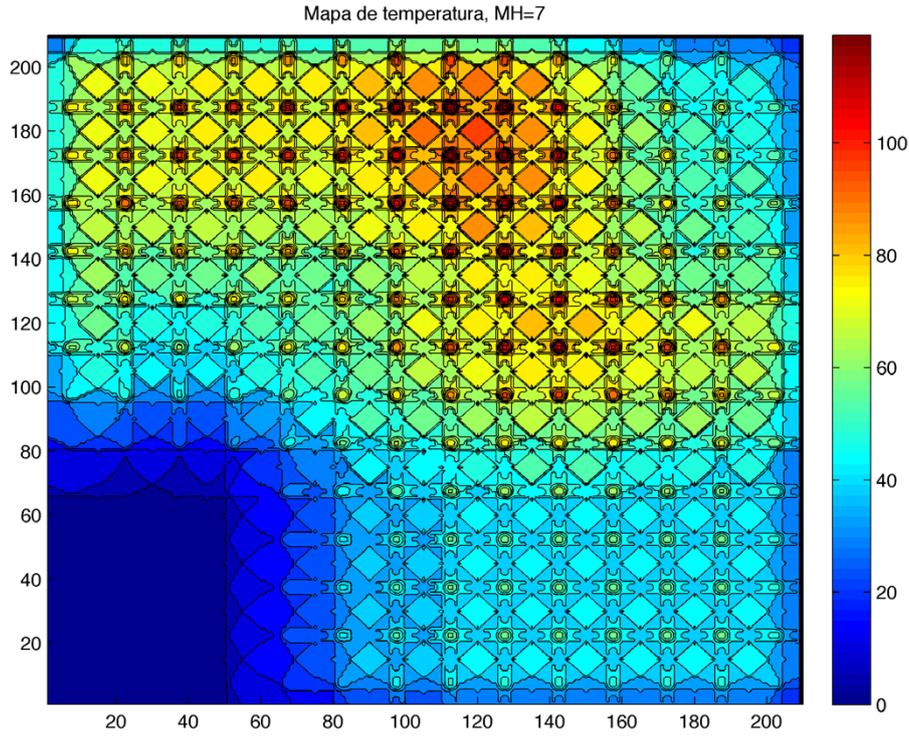


Figura 5.25 - Mapa de temperatura para MH=7 y con selección aleatoria de gateways. Función de peso lineal

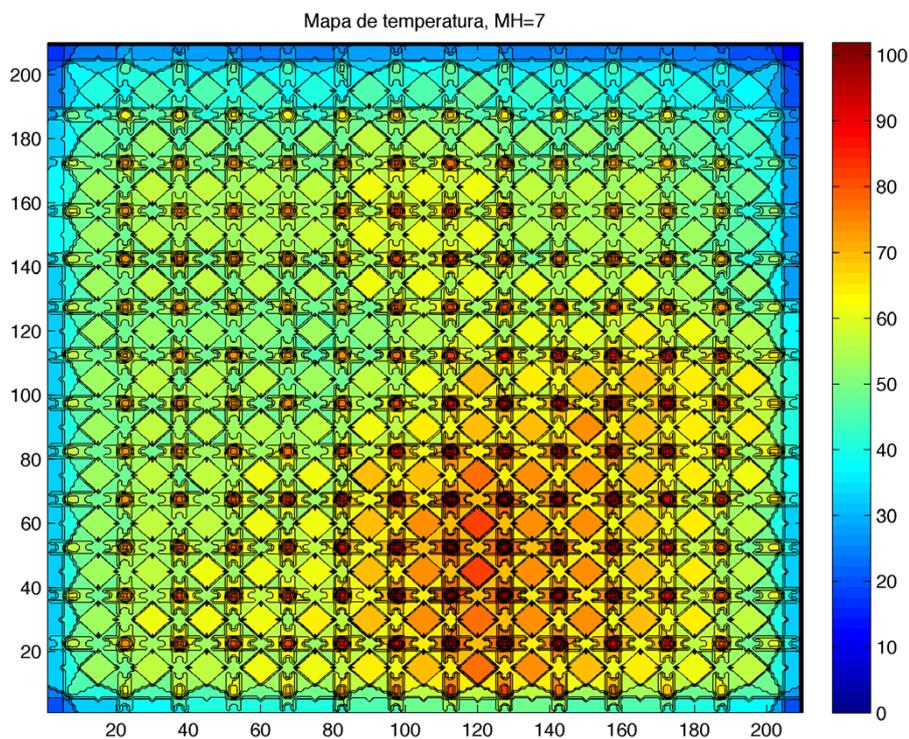


Figura 5.26 - Mapa de temperatura para MH=7 y con selección aleatoria de gateways. Segunda función de peso

Aquí se aprecia muy bien la ganancia en cuanto a cobertura global de la segunda función de peso en cuanto a cobertura global, el mapa de temperatura tiene menos zonas frías que en el caso de la función de peso aleatoria y lineal.

De la misma manera que anteriormente no era posible extraer conclusiones evaluando únicamente uno de los parámetros que caracterizan el funcionamiento de la red, ahora es necesario estudiar el comportamiento de otros. Para ello, se estudiará cómo se ven afectados los nodos fuera de la red pero con batería (outage) por la política de selección de agregadores elegida.

Se ha visto la diferencia en cobertura de las funciones para elegir el gateway. A continuación veremos las diferencias en términos de nodos aislados, nodos fuera de la red, para el caso de 3 saltos. Se considera un nodo como aislado cuando es elegido como gateway pero no tiene a ningún vecino, cuando se da esta situación se considera que el nodo está aislado, ya nunca más podrá volver a formar parte de la red.

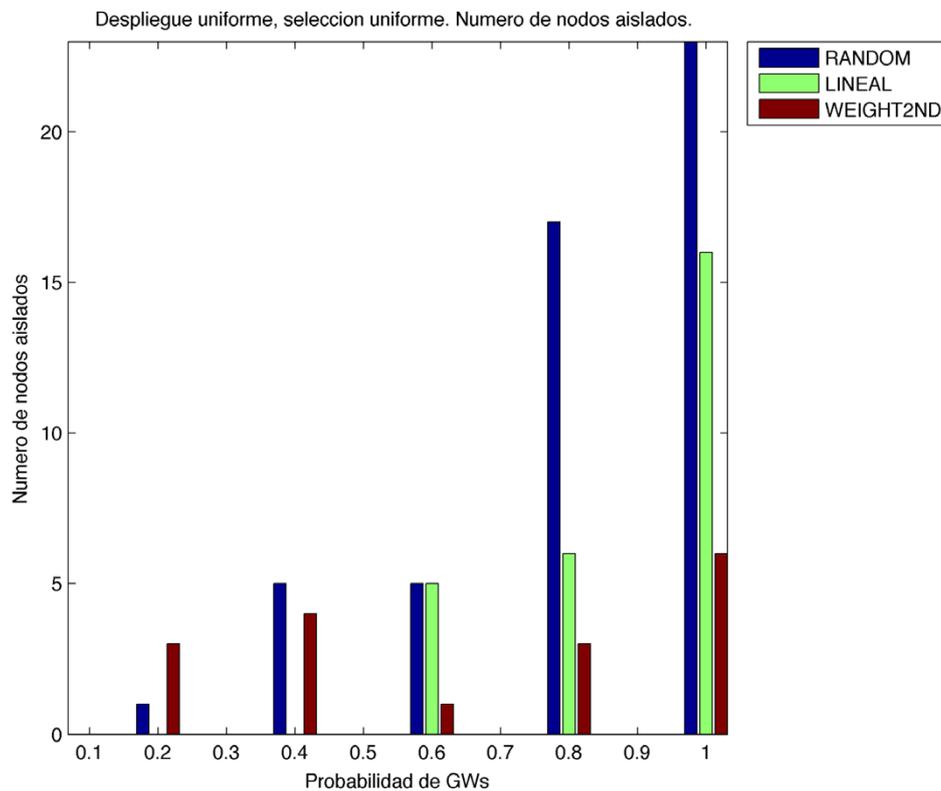


Figura 5.27 – Nodos aislados para un despliegue uniforme y una selección óptima de gateways

En esta primera figura (Figura 5.27) se observa que la estrategia aleatoria es la peor de todas a medida que crece la densidad de gateways. Hay más nodos aislados en la aleatoria debido a que se elige un gateway aleatoriamente de entre todos los disponibles y no se tienen información de contexto como sí ocurre con la función de peso lineal y la segunda función de peso.

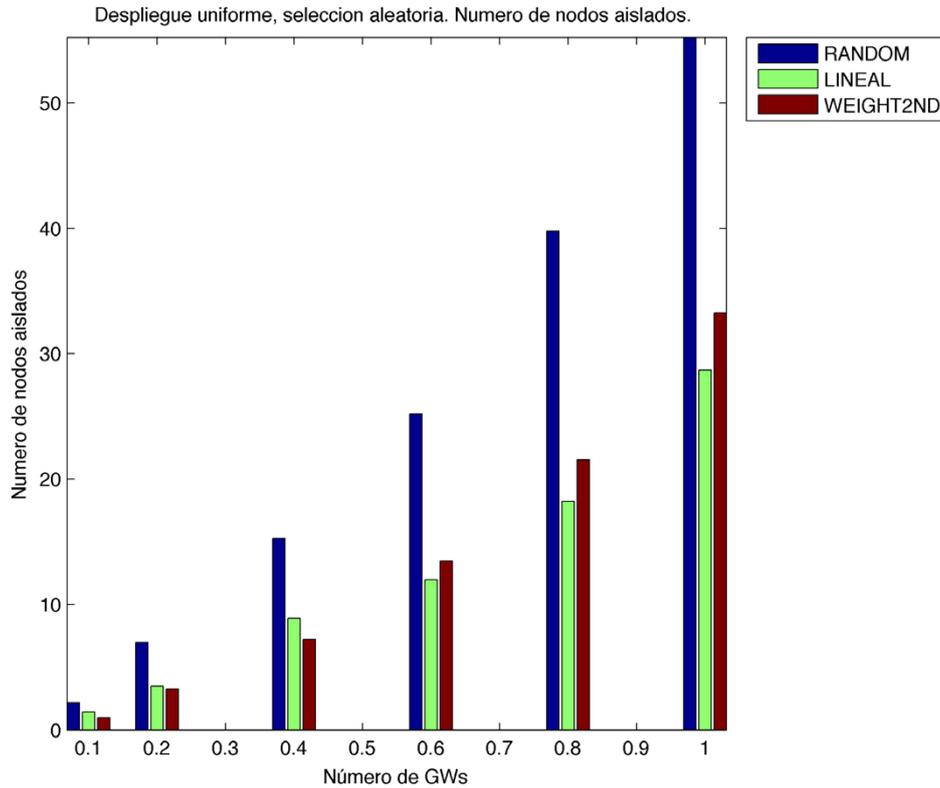


Figura 5.28 – Nodos aislados para un despliegue uniforme y una selección aleatoria de gateways

La figura de la parte superior (Figura 5.28) muestra el número de nodos aislados para un despliegue uniforme de nodos y una selección aleatoria de los posibles gateways. En este caso el número de nodos aislados aumenta con respecto al caso anterior debido a la selección aleatoria de gateways, ya que cualquier nodo de la red puede ser gateway en un principio, mientras que en la selección óptima se escogen como posibles gateways aquellos que minimicen la distancia al resto de nodos de la red, asegurándonos de esta manera redes más densas.

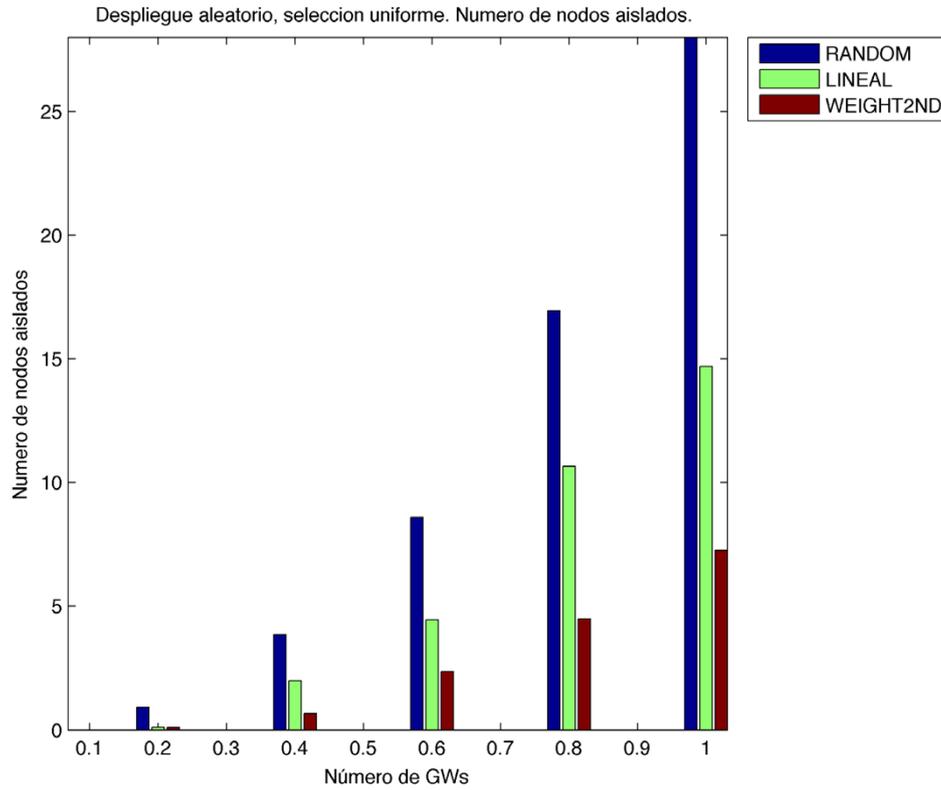


Figura 5.29 – Nodos aislados para un despliegue aleatorio y una selección uniforme de los gateways

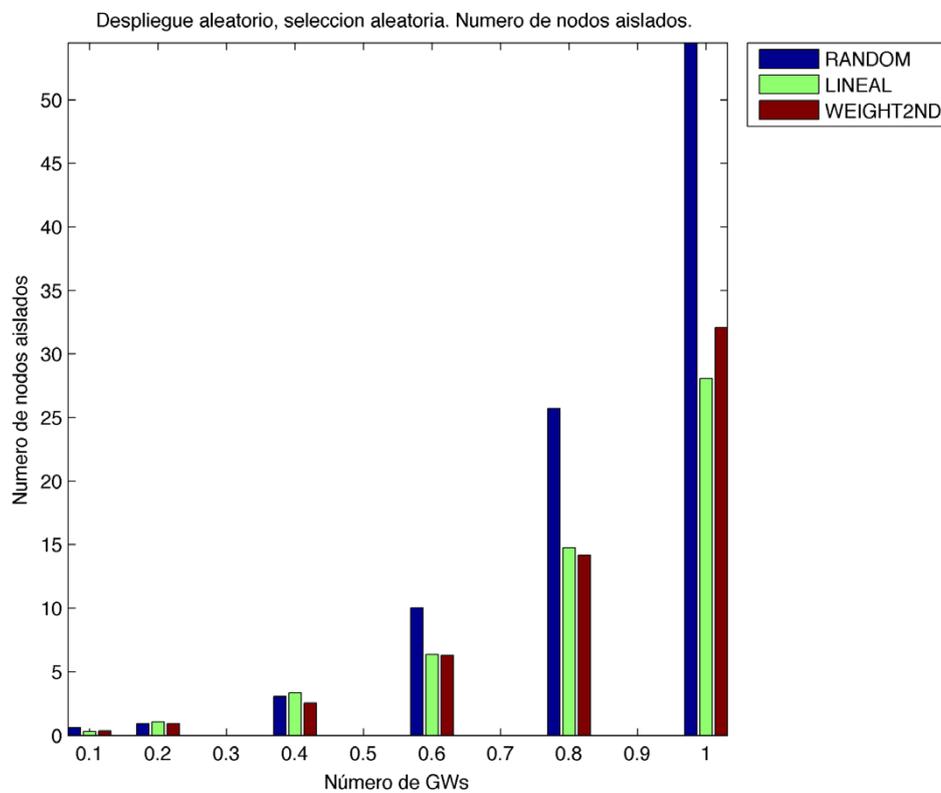


Figura 5.30 – Nodos aislados para un despliegue aleatorio y una selección aleatoria de los gateways

Como se ha mostrado en las gráficas anteriores (Figura 5.27, Figura 5.28, Figura 5.29 y Figura 5.30), la función aleatoria se comporta muy mal en términos de nodos aislados, tanto las funciones de peso lineal como la segunda función de peso mejoran notablemente los resultados. Cuando la selección inicial de los gateways se realiza de forma aleatoria se obtiene un mayor número de nodos aislados por la razón explicada anteriormente. Por lo tanto se puede concluir que la selección óptima de gateways es mejor si queremos minimizar el número de nodos aislados en la red.

Las siguientes gráficas (Figura 5.31, Figura 5.32 y Figura 5.33) muestran la evolución de los nodos sin batería en la red frente a los mensajes enviados, se ha fijado como selección inicial de gateways la selección óptima, pues como se ha visto es mejor en términos de nodos aislados. Se comparan las tres funciones de peso para un despliegue aleatorio de los nodos y se representan las curvas para diferentes densidades de gateways.

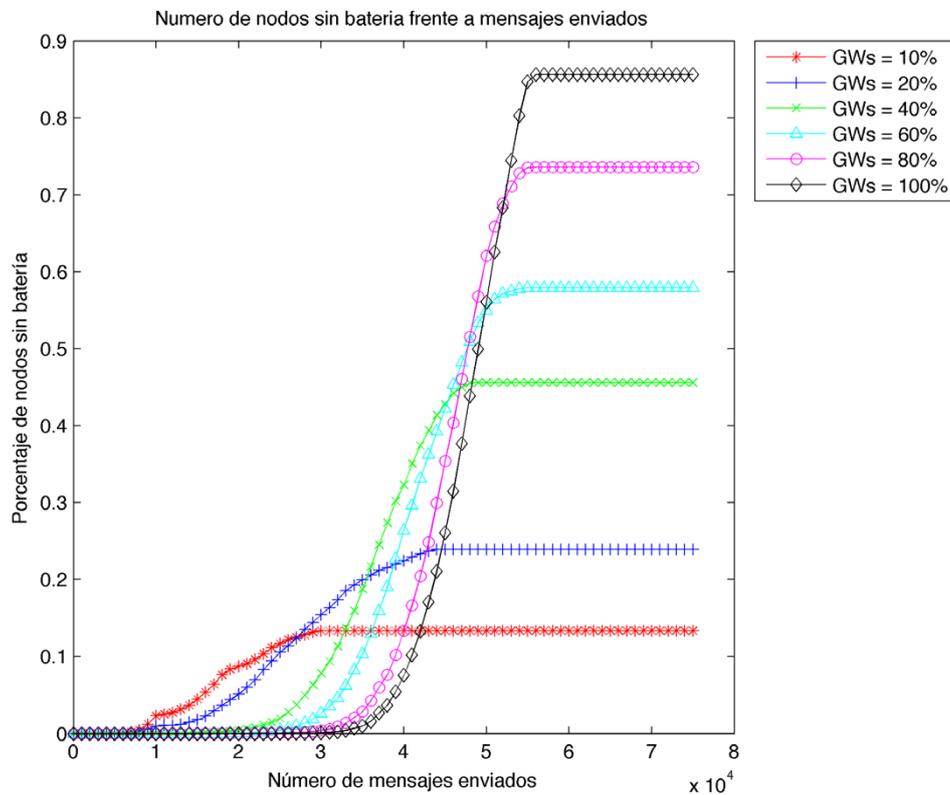


Figura 5.31 – Número de nodos sin batería frente a mensajes enviados. Despliegue aleatorio, selección uniforme. Función de peso aleatoria

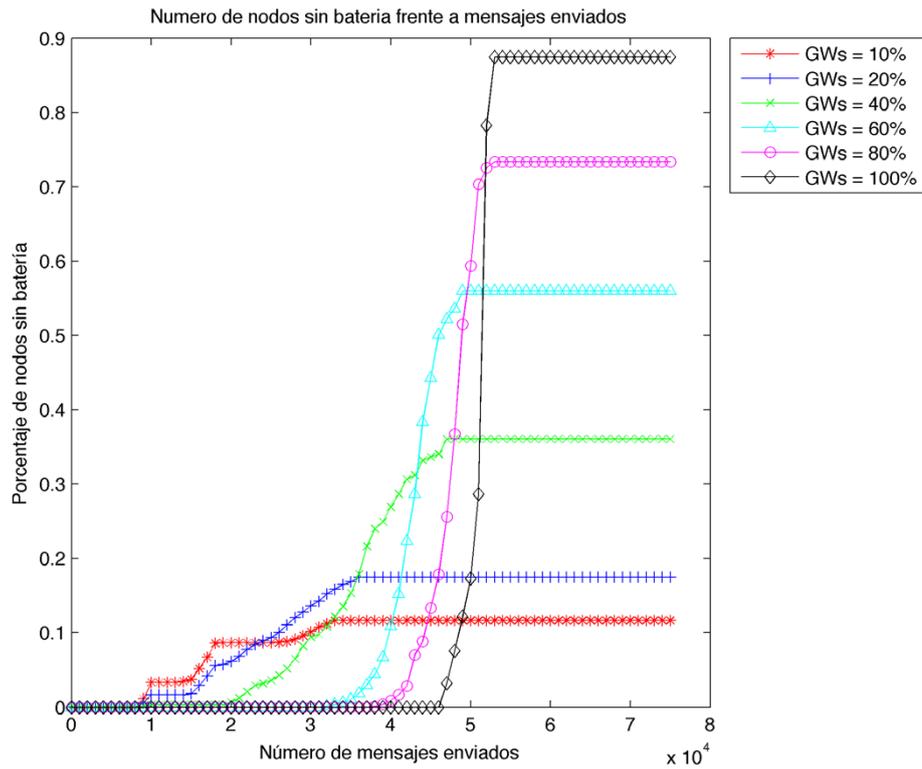


Figura 5.32 - Número de nodos sin batería frente a mensajes enviados. Despliegue aleatorio, selección uniforme. Función de peso lineal

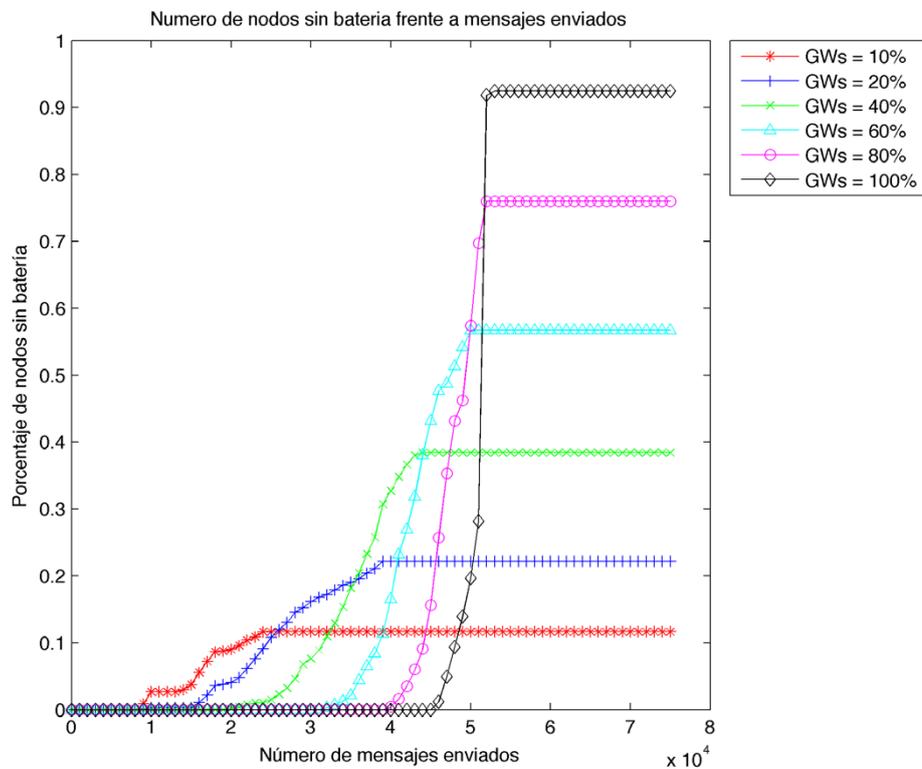


Figura 5.33 - Número de nodos sin batería frente a mensajes enviados. Despliegue aleatorio, selección uniforme. Segunda función de peso

Se puede observar en las gráficas anteriores (Figura 5.31, Figura 5.32 y Figura 5.33) que en el caso de la función de peso aleatoria los nodos comienzan a quedarse antes sin batería, pero a partir de ahí, los nodos que se van quedando sin batería lo hacen más despacio que en las otras dos funciones de peso (lineal y segunda función de peso). Esto es debido a que la función de peso lineal y la segunda función de peso escogen al principio el gateway óptimo y se envían muchos mensajes, pero cuando ese nodo se queda sin batería los demás nodos tienen menos batería que en el caso de la función aleatoria (porque se han enviado más mensajes) y por lo tanto los nodos se van quedando sin batería más rápido.

En las gráficas también se puede observar que a mayor número de gateways en la red mayor número de mensajes se envían. Todas las gráficas tienden asintóticamente a la densidad de gateways.

Un último parámetro que se puede variar en el simulador es el umbral de reconfiguración, este umbral define el nivel de batería del gateway por debajo del cual se produce una reconfiguración. Se ha realizado un análisis del número de mensajes de datos, del número de nodos fuera de la red que tienen batería y del número de nodos sin batería en función de tres umbrales de reconfiguración, 20%, 50% y 75% y de tres densidades de gateways, 20%, 60% y 80%, se ha fijado un número máximo de saltos a 3. Se analizan los casos de selección inicial aleatoria de gateways y de selección óptima para un despliegue aleatorio.

En el primer grupo de gráficas (Figura 5.34, Figura 5.35 y Figura 5.36) se muestra el número de mensajes enviados para la función de peso aleatoria. La subgráfica de la izquierda muestra un despliegue aleatorio y una selección inicial de gateways uniforme, mientras que la de la derecha muestra un despliegue aleatorio también pero la selección inicial es óptima.

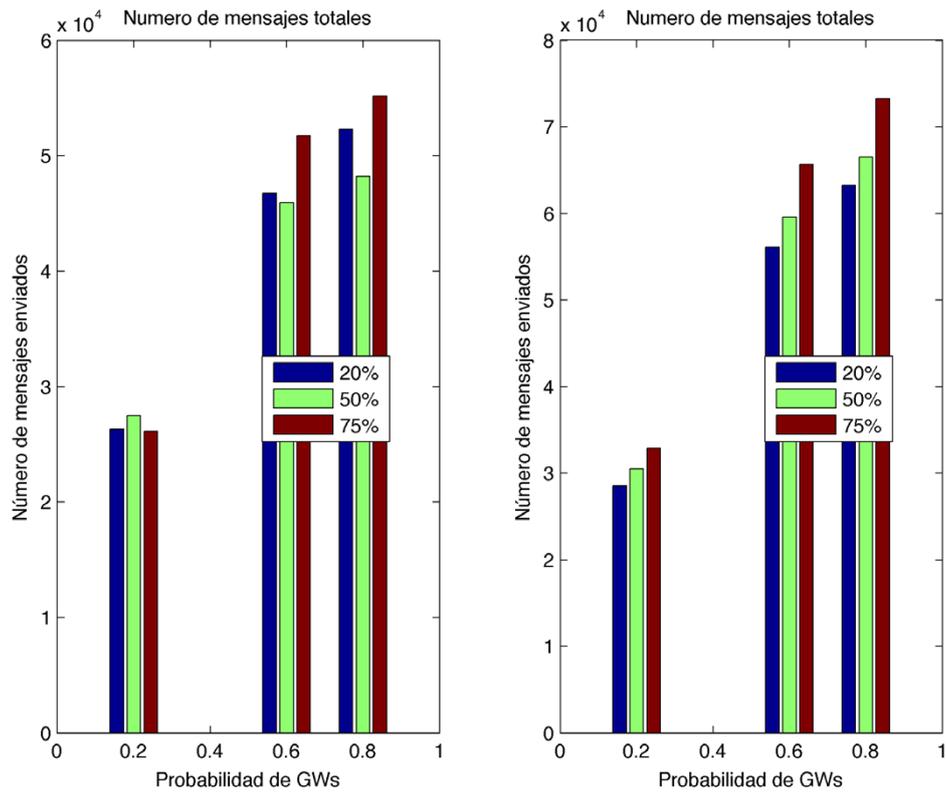


Figura 5.34 – Número de mensajes de datos enviados en función del umbral. Función de peso aleatoria

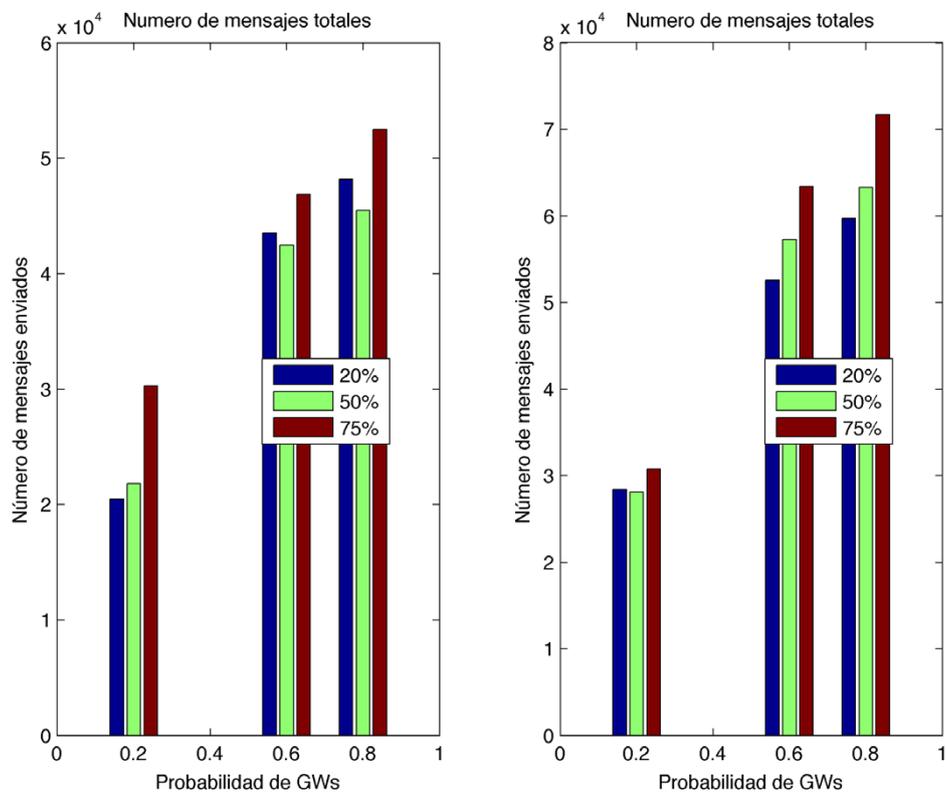


Figura 5.35 - Número de mensajes de datos enviados en función del umbral. Función de peso lineal

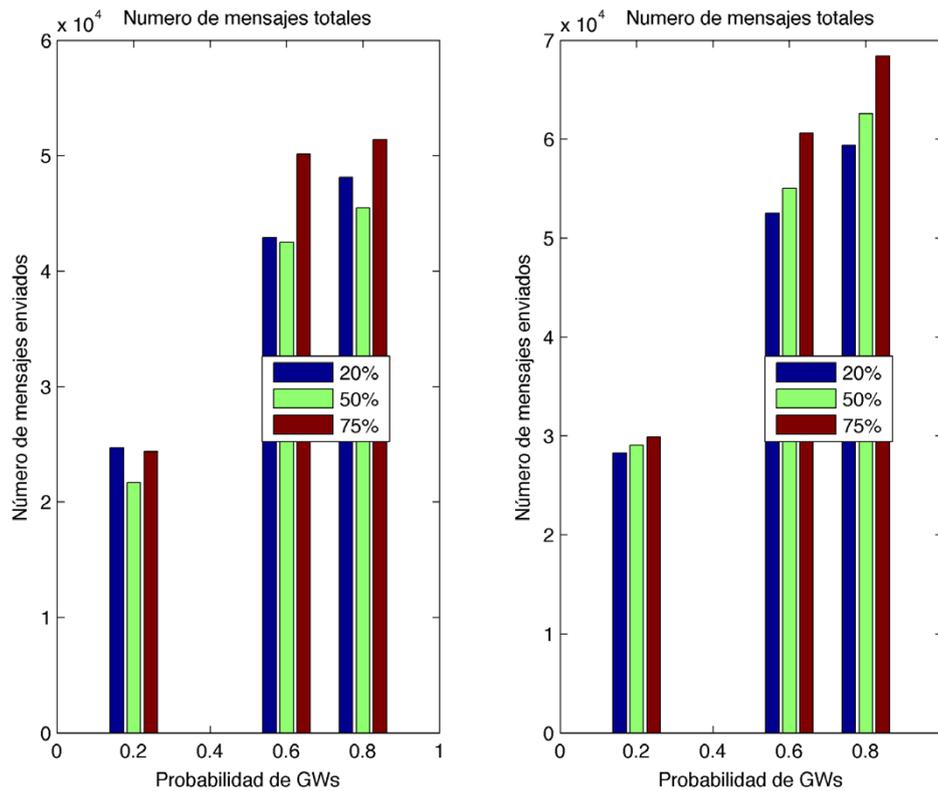


Figura 5.36 - Número de mensajes de datos enviados en función del umbral. Segunda función de peso

Independientemente del escenario de simulación, se obtiene un mayor número de mensajes enviados con el umbral superior, esto es debido a que al fijar el umbral tan alto se producen menos reconfiguraciones que para umbrales inferiores, esto implica que se intercambiarán menos mensajes HELLO , RREQ y RREP con el consiguiente ahorro de batería y el aumento en los mensajes enviados.

En un principio podría parecer que a mejor umbral mejores resultados se obtienen, a continuación se ve que no es así para el número de nodos fuera de la red pero que tienen batería (Figura 5.37, Figura 5.38 y Figura 5.39).

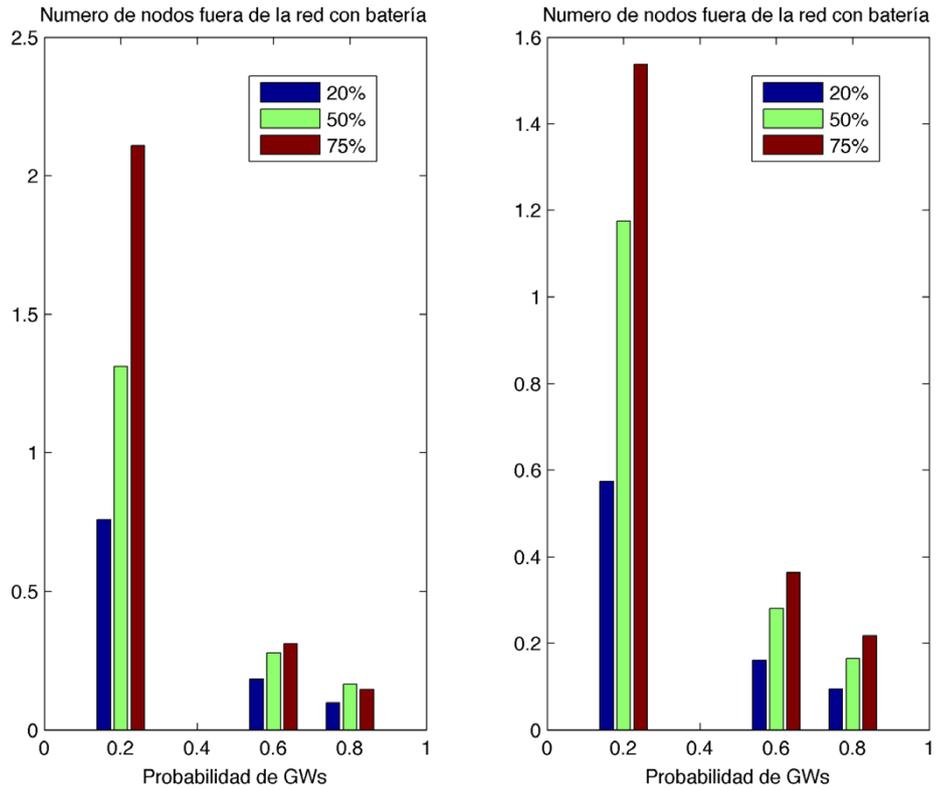


Figura 5.37 – Número de nodos fuera de la red pero con batería/reconfiguración. Función de peso aleatoria

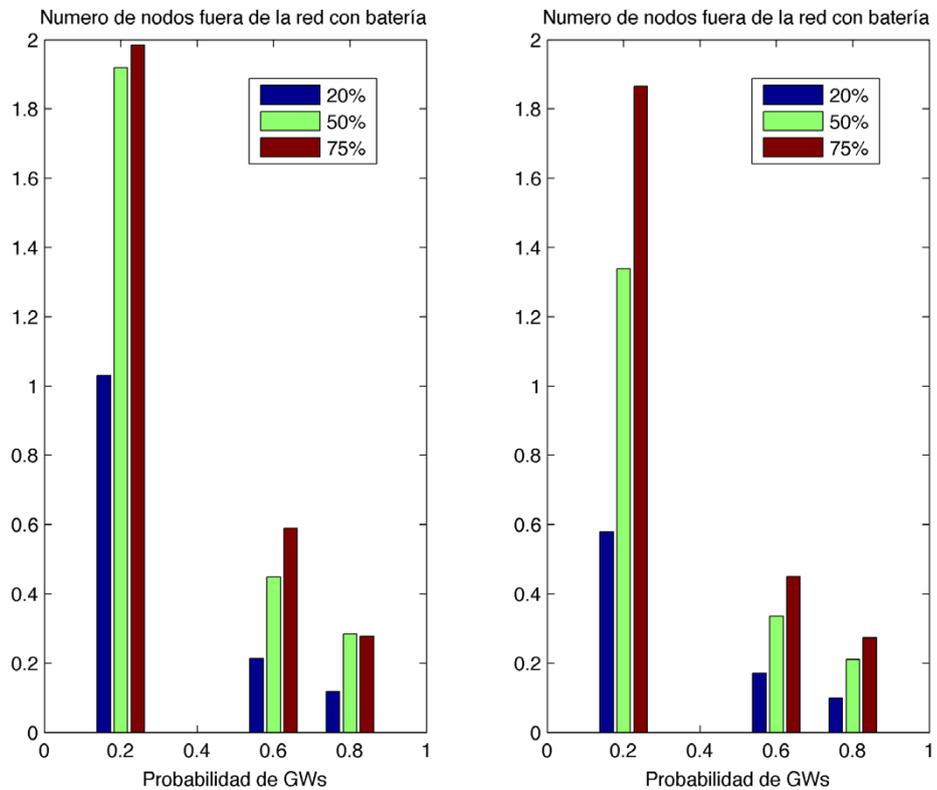


Figura 5.38 - Número de nodos fuera de la red pero con batería/reconfiguración. Función de peso lineal

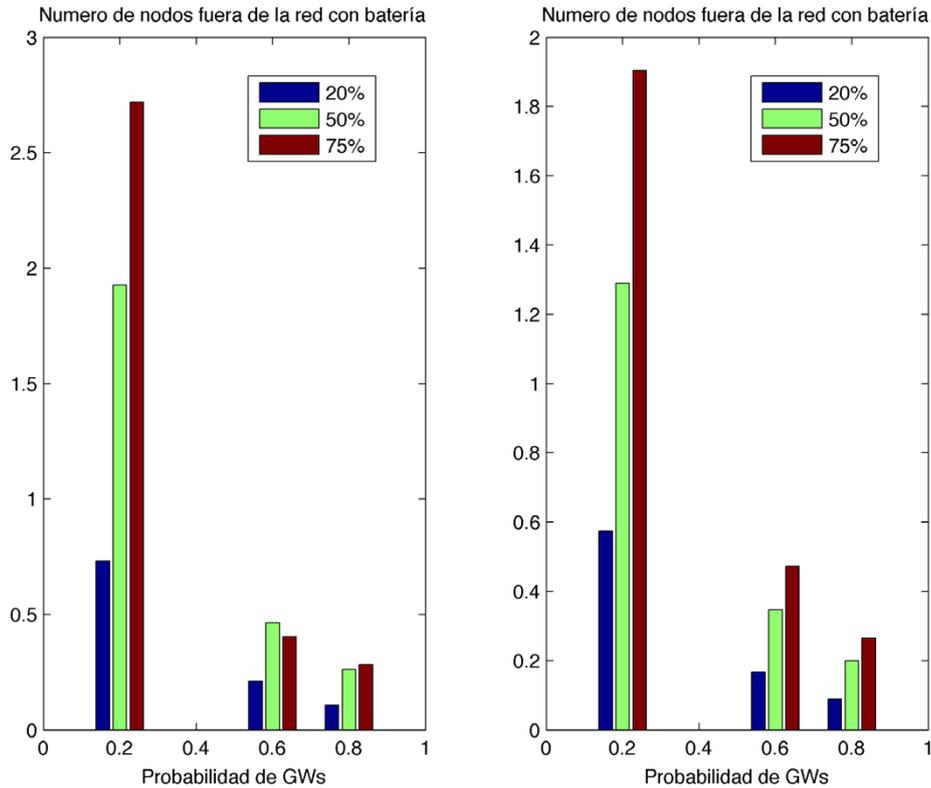


Figura 5.39 - Número de nodos fuera de la red pero con batería/reconfiguración. Segunda función de peso

En todos los casos el número de nodos que se quedan fuera de la red por reconfiguración pero que tienen batería crece a medida que aumenta el umbral de reconfiguración. Esto se debe a que el umbral de reconfiguración representa, de alguna manera, el tiempo de muestreo de la red, a mayor umbral la red es menos dinámica y reacciona de forma más lenta a los cambios, de ahí que obtengamos mejores resultados para umbrales pequeños, la red es más dinámica. Por lo tanto vuelve a existir un compromiso entre maximizar el número de mensajes enviados y minimizar las zonas de sombra.

Se muestra por último la evolución temporal (frente al número de mensajes enviados) de los nodos que se quedan sin batería para una densidad de gateways del 60%.

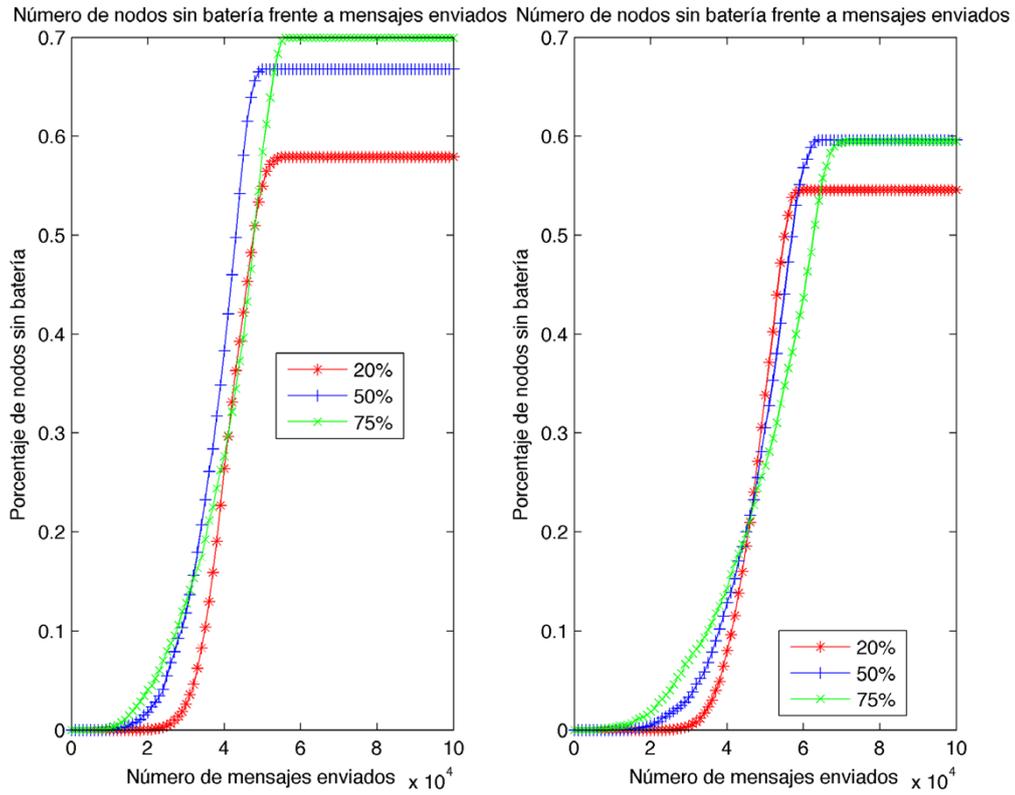


Figura 5.40 – Número de nodos sin batería frente a número de mensajes enviados. Función de peso aleatoria

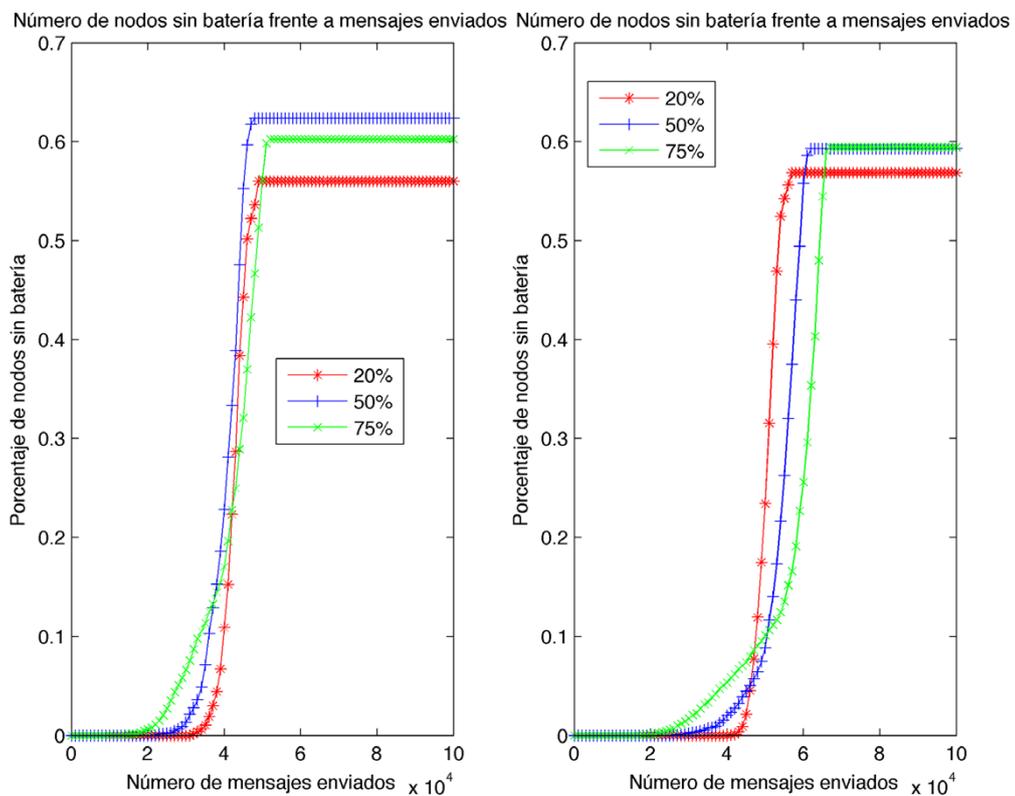


Figura 5.41 - Número de nodos sin batería frente a número de mensajes enviados. Función de peso lineal

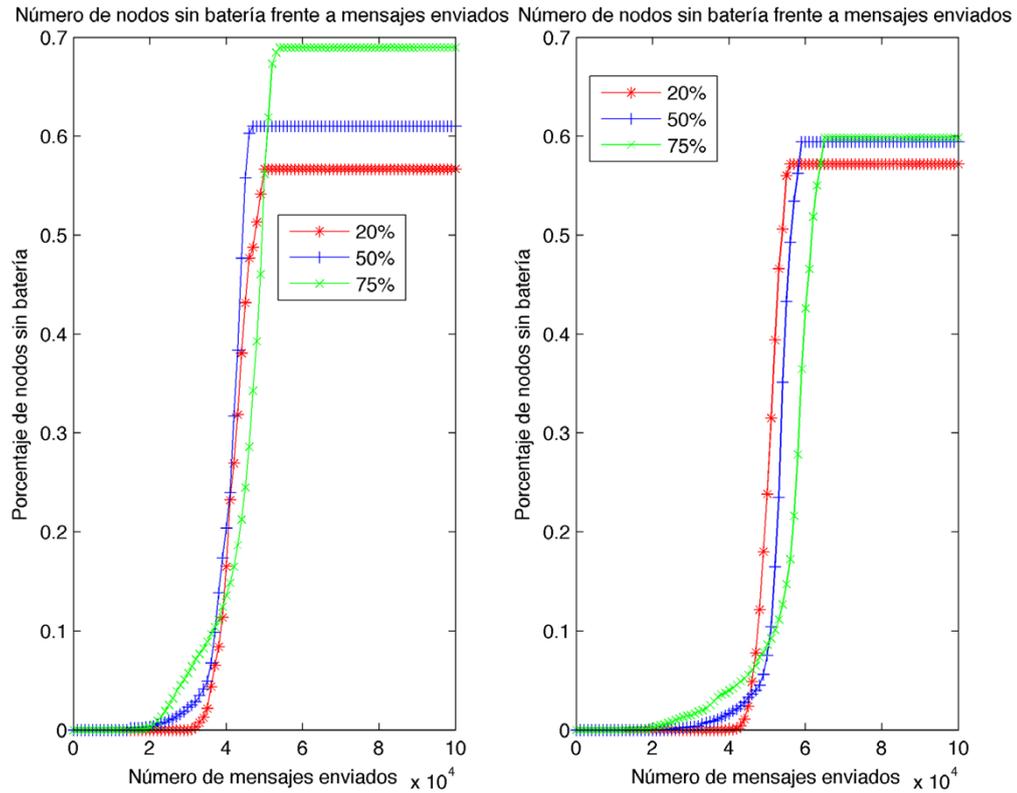


Figura 5.42 - Número de nodos sin batería frente a número de mensajes enviados. Segunda función de peso

En las gráficas superiores (Figura 5.40, Figura 5.41 y Figura 5.42) se aprecia que a mayor umbral el porcentaje de nodos sin batería es mayor (al final de la simulación), esto se debe a que con umbrales altos el tiempo enviando mensajes es superior (hay pocas reconfiguraciones) pero en cambio la batería de los nodos se ha agotado casi por completo en cada reconfiguración, hay que tener en cuenta que para un umbral de reconfiguración del 75% y suponiendo una batería inicial del 100%, cuando se produzca y una reconfiguración el gateway tan sólo tendrá el 25% de su batería inicial y los dispositivos finales también habrán consumido más batería que si el umbral fuese del 20%. Por lo tanto al final de la simulación habrá un mayor número de nodos sin batería cuanto mayor sea el umbral de reconfiguración.

También se pueden comparar las dos estrategias de selección inicial de gateways, se observa que la batería se agota más despacio para el caso de la selección óptima, esto es debido a que la con la selección óptima se forman islas de gran densidad pero con un número bajo de saltos y por lo tanto el gasto de la batería será más lento.

6 Conclusiones y Líneas Futuras

6.1 Conclusiones

En el desarrollo de este proyecto se ha afrontado uno de los mayores retos existentes en la actualidad en el campo de las aplicaciones M2M. El objetivo de este trabajo era evaluar los beneficios potenciales que pueden introducir en este tipo de sistemas soluciones que se alejan de las soluciones de gestión de redes de sensores inalámbricas convencionales. La explotación de los beneficios de las particularidades que caracterizan a las redes capilares se ha mostrado como un campo de investigación del que pueden conseguir importantes medidas para el ahorro de energía y recursos en los dispositivos que lo implementan.

A partir de lo anteriormente comentado y en base a las simulaciones que se han desarrollado para la evaluación de las diferentes características del sistema, se pueden extraer diferentes conclusiones.

- El balanceo de la carga asociada al funcionamiento como agregador de tráfico dentro de una red capilar beneficia a la red en todos los aspectos.
- Las mejoras aportadas por las soluciones complejas para la selección de agregadores de tráfico son altamente dependientes del modo en que los nodos hayan sido desplegados.
- La selección del número máximo de saltos permitidos en la red es un parámetro que depende altamente de lo tolerante al retraso que sea la aplicación que hace uso de los datos generados por los dispositivos de la red. En el escenario evaluado se ha comprobado que 3 saltos es la mejor opción, ya que obtiene el mejor compromiso entre maximizar la vida útil de las baterías y maximizar la cobertura global.
- La población de gateways dentro de una red capilar aumenta las posibilidades de balanceo de la carga, sin embargo, el coste por dispositivo es mayor. Se ha comprobado en las simulaciones que es más importante el posicionamiento óptimo de los gateways dentro de la red, por encima de la cantidad de ellos que se incluyan.
- Las funciones de peso consideradas, lineal y solución avanzada, mejoran notablemente el rendimiento de la red con respecto a la selección aleatoria de un nodo para realizar las funciones de agregación.
- La inclusión en el simulador de dispositivos que envían datos con diferente periodicidad aporta un grado de heterogeneidad que resulta muy interesante para el balanceado de la carga.
- Las propuestas realizadas han sido desarrolladas considerando que la toma de decisión es realizada por una entidad externa concedora de todos los parámetros de la red y los nodos que la componen. Para la implementación real de esta propuesta se haría necesario desarrollo un protocolo que comparta y distribuya la información de contexto de todos los elementos de forma óptima.
- La combinación de las estrategias evaluadas con optimizaciones en la capa de red con soluciones para las capas inferiores como protocolos MAC o sistemas de codificación más eficientes en capa física o mecanismo de *energy harvesting* conseguirían alargar de forma notable la vida de este tipo de redes.

Finalmente ha quedado demostrado que existe una gran cantidad de aplicaciones que pueden mejorar el funcionamiento de las redes de sensores, especialmente con las previsiones de despliegues de dispositivos que traen asociadas tanto las ciudades inteligentes como la internet de las cosas.

6.2 Líneas Futuras

Este trabajo abre vías para investigaciones más avanzadas en este campo. Entre las principales cabe destacar las siguientes:

- La posibilidad de tener los dispositivos en un estado de bajo consumo y que envíen datos no periódicamente si no cuando detecten alguna medida anómala. Dependiendo de la aplicación específica de los dispositivos se podría asumir un periodo mucho mayor de control del dispositivo y envío de datos sólo en caso de necesidad. Es decir, modificar el patrón de comunicación, dejaría de ser envío periódico a ser provocado por evento.
- La optimización de los pesos asignados a las variables de la segunda función de peso (parámetros α , β y γ) en función del tipo de aplicación y del despliegue. Puede ser que interese maximizar la vida útil de la batería más que cubrir un gran área, en este caso se puede aumentar el peso del parámetro relacionado con la batería y reducir los demás.
- Otra mejora posible es la introducción de varios gateways actuando simultáneamente, de esta manera se mejora la cobertura global, ya que podríamos tener un gateway atendiendo a cada isla.
- Los dispositivos que no forman parte de la red pero que tienen batería podrían guardar en un buffer las medidas realizadas para enviarlas al gateway cuando vuelvan a formar parte de la red en sucesivas reconfiguraciones.
- La incorporación del protocolo diseñado a un simulador real de red como NS resultaría muy útil para considerar una aproximación multicapa de las mejoras reales que ofrecería esta propuesta.
- Finalmente, la incorporación de conceptos propios de las DTN (Delay Tolerant Networks) en combinación con la selección de agregadores de tráfico podrían dar como resultado aumentos muy importantes en la vida de las redes. No obstante, este tipo de estudios deben identificar claramente los casos de uso para los que podrían ser aplicados estos conceptos.

Referencias

- [1] TSmarT: <http://www.tst-sistemas.es/productos>
- [2] Protocolo DSR: <http://www.ietf.org/rfc/rfc4728.txt>
- [3] Protocolo AODV: <http://tools.ietf.org/html/rfc3651>
- [4] Protocolo DSDV: Perkins, C. y Bhagwat, P.; *Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers*, 1994.
- [5] Protocolo OLSR: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>
- [6] Protocolo TORA: <http://www.ietf.org/id/draft-ietf-manet-tora-spec-04.txt>
- [7] Estándar IEEE 802.15.4: <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.15.html>
- [8] IETF 6LoWPAN: <http://datatracker.ietf.org/wg/6lowpan/charter>
- [9] ZigBee Alliance: <http://www.zigbee.org/es>
- [10] Bluetooth: Bluetooth SIG; *How Bluetooth Technology works*.
- [11] Health Device Profile: Bluetooth SIG; *Health Device Profile*, Junio 2008.
- [12] DASH7 White paper: <http://www.dash7.org/DASH7%WP20%20ed1.pdf>
- [13] HART: <http://www.hartcomm.org>
- [14] IEC 62591:
http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/EMR_WirelessHART_SysEngGuide.pdf
- [15] <http://img.xatakamovil.com/2012/03/sistemas-de-comunicaciones-moviles.jpeg>
- [16] Agüero Calvo, R.; *Redes Inalámbricas de Área Local y Personal*. Apuntes de la asignatura Redes de Acceso Celular.
- [17] GSM Phase 2+, Release 1997.
- [18] ETSI GSM Specification 02.60 Digital cellular telecommunications system (Phase2+); *General Packet Radio Service: Service description, Stage1*, 1999.
- [19] ETSI GSM Specification 03.60 Digital cellular telecommunications system (Phase2+); *General Packet Radio Service: Service description, Stage2*, 1999.
- [20] ETSI GSM Specification 03.64 Digital cellular telecommunications system (Phase2+); *General Packet Radio Service, Overall description of the GPRS radio interface, Stage2*, 1999.
- [21] Halonen, T.; Romero, J. y Melero, J., *GSM, GPRS and EDGE Performance – Evolution Towards 3G/UMTS*, John Wiley&Sons, ISBN 047084457 4, 2002.
- [22] 3G Release 99, ver en *Technical Specifications and Technical Reports for a UTRAN-based 3GPP system*.
- [23] Sesia, S.; Toufik, I. y Baker, M.; *LTE-The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*, John Wiley&Sons, 2009.
- [24] Web de la ETSI: <http://www.etsi.org/WebSite/homepage.aspx>
- [25] Web del 3GPP: <http://www.3gpp.org>
- [26] Distributech; White paper, Enero 2008.
- [27] Ceballos Sierra, F.J.; *Programación orientada a objetos con C++*, Ra-Ma.
- [28] Web de cplusplus: <http://www.cplusplus.com>
- [29] Web de Eclipse: <http://www.eclipse.org>
- [30] Web de Matlab: <http://www.mathworks.es/products/matlab>

- [31]Dijkstra, E.W.; *A note on two problems in connexion with graphs*, Numerische Mathematik 1: 269-271. DOI: 10.1007/BF01386390.
- [32]Web de Perl: <http://www.perl.org>
- [33]Bourne shell: <http://www.kitebird.com/csh-tsch-book/csh-intro.pdf>
- [34]AWK: <http://cm.bell-labs.com/cm/cs/awkbook/index.html>
- [35]Sed: <http://pubs.opengroup.org/onlinepubs/9699919799/utilities/sed.html>
- [36]Lisp: <http://paulgraham.com/onlisptext.html>

Acrónimos

2.5G	2.5 Generation
2G	2nd Generation
3G	3rd Generation
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	4th Generation
6LoWPAN	IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks
AODV	Ad-hoc On-demand Distance Vector
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
ARQ	Automatic Repeat Request
ATIS	Alliance for Telecommunications Industry Solutions
BG	Border Gateway
BLAST	Bursty, Light-data, Asynchronous, Transitive
C2C	Car-to-Car
CAN	Controller Area Network
CCSA	China Communications Standards Association
CDF	Cumulative Distribution Function
CDMA	Code Division Multiple Access
CN	Core Network
DoS	Denial of Service
DSDV	Destination Sequenced Distance Vector
DSR	Dynamic Source Routing
DSRC	Dedicated Short Range Communication
DSS	Diagnostic Support Systems
DSSS	Direct-Sequence Spread Spectrum
DTN	Delay Tolerant Network
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access
ECV	Enfermedades Cardiovasculares
ED	Dispositivo Final
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EHR	Electronic Health Record
eNodeB	Evolved NodeB
EPC	Evolved Packet Core
EPOC	Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica
EPS	Evolved Packet System
ESM	Energy Smart Metering
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FDD	Frequency Division Duplex
FFD	Full-Function Device
FP7	Framework Program 7
FTP	File Transfer Protocol
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GPRS	General Packet Radio Service

GPS	Global Positioning System
GSM	Global System Telecommunications
GW	Gateway
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HART	Highway Adressable Remote Transducer
HDP	Health Device Profile
HIMSS	Health Information and Management Systems Society
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
HSPA	High-Speed Packet Access
HSUPA	High-Speed Uplink Packet Access
IETF	Internet Engineering Task Force
iMANETs	Internet Mobile Ad-hoc Networks
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IMT	International Mobile Telecommunications
InVANETs	Intelligent Vehicular Ad-hoc Networks
IP	Internet Protocol
ISA	International Society of Automation
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ISP	Internet Service Provider
ITS	Intelligent Transport Systems
LR-WPAN	Low Rate Wireless Personal Area Networks
LTE	Long Term Evolution
LTE-M	Long Term Evolution para comunicaciones M2M
M2M	Machine-to-Machine
MAC	Media Access Control
MANET	Mobile Ad-hoc Network
MI	Monitorización Industrial
MIMO	Multiple-input Multiple-output
MM	Monitorización Medioambiental
MS	Mobile Station
MTC	Machine Type Communications
MU-MIMO	Multiple User-MIMO
NC	Network Composition
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OLSR	Optimized Link-State Routing
OSI	Open System Interconnection
PACS	Picture Archiving and Communication System
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PDA	Personal Digital Assitant
PDCCP	Packet Data Convergence Protocol
PDN	Public Data Network
PLC	Power Line Communications
PNM	Personal Network Management
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service

RADIUS	Remote Authentication Dial In User Service
RAN	Radio Access Network
RFC	Request For Comment
RFD	Reduced-Function Device
RFID	Radio Frequency Identification
RLC	Radio Link Control
RREP	Route REPLY
RREQ	Route REQuest
SA	Service and System Aspects
SC-FDMA	Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access
SFBC	Single Frequency Block Coding
SGSN	Serving GPRS Support Node
SIP	Session Initiation Protocol
SL-SM	Single-Layer Spatial Multiplexing
SM	Spatial Multiplexing
SMS	Short Message Service
SU-MIMO	Single User-MIMO
SV	Seguridad y Vigilancia
TBC	Tuberculosis
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TORA	Temporally Ordered Routing Algorithm
TTA	Telecommunications Technology Association
TTC	Telecommunications Technology Committee
UE	User Equipment
UE	Unión Europea
UHF	Ultra High Frequency
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
V2V	Vehicle-to-Vehicle
VANETs	Vehicular Ad-hoc Networks
VG	Vehículo Gateway
VIH	Virus de la Inmunodeficiencia Humana
VPH	Virus del Papiloma Humano
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Networks
WWW	World Wide Web