

Evaluación del estándar de red inalámbrica IEEE 802.15.4 para la transmisión de datos
utilizados en una micro red eléctrica

Jhonys Fernando Vallejo Acevedo

Iván David Meneses López.

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Electrónico

Director

Juan David Bastidas Rodríguez.

Doctor en ingeniería con énfasis en eléctrica y electrónica.

Codirector

Pedro Javier Trujillo Tarazona

Ing. de sistemas, Magister en Informática.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías físico-mecánicas

Escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y telecomunicaciones.

Bucaramanga

2018

“Dedico este trabajo de grado a Dios y a toda su gloria, con mucho amor a mi mamá que con tanto cariño, paciencia y esfuerzo me ayudó y acompañó en este largo camino, a mi papá a quien por sus grandes enseñanzas siempre he admirado y siempre me apoyó incluso en los momentos más difíciles y a mis hermanos Didier y Dihuber por quienes siempre he luchado por ser mejor”.

-Jhonys Fernando Vallejo Acevedo.

“Dedico este trabajo de grado a mi madre que me brindo todo su apoyo, cariño y amor desde el primer momento que estuve en sus brazos, a mi padre por darme todo, por sus enseñanzas y por todo el afecto que me ha brindado siempre, a mis hermanas Adriana y Genny por enseñarme lo que es ser fuerte y luchar por lo que se quiere y finalmente a Yessica por acompañarme 5 años en esta travesía, sin ellos hoy en día no sería orgullosamente el primer ingeniero en la familia. Gracias totales”.

- Iván David Meneses López.

Agradecimientos

Agradecemos muy especialmente a nuestros directores: los profesores Juan David Bastidas Rodríguez y Pedro Javier Trujillo Tarazona por su guía, paciencia y colaboración.

Tabla de contenido

| | |
|---|----|
| Introducción | 16 |
| 1 Objetivos | 18 |
| 1.1 Objetivo General | 18 |
| 1.2 Objetivos Específicos | 18 |
| 2 Marco teórico | 18 |
| 2.1 Micro redes eléctricas: | 18 |
| 2.1.1 Elementos de una micro red. | 19 |
| 2.2 Redes inalámbricas de área personal de baja velocidad (LR-WPAN) | 21 |
| 2.2.1 Componentes de una LR-WPAN. | 22 |
| 2.2.2 Topologías | 22 |
| 2.2.3 Características de desempeño de una LR-WPAN. | 24 |
| 2.3 Estándar IEEE 802.15.4 | 25 |
| 2.3.1 Arquitectura. | 26 |
| 2.3.2 Capa física (PHY) | 27 |
| 2.3.3 Sub capa control de acceso al medio (MAC) | 27 |
| 2.3.4 Protocolo de evaluación de canal libre (CCA) | 27 |
| 2.3.5 Tramas | 28 |
| 2.3.6 Estructura de la supertrama. | 28 |
| 2.3.7 Mecanismo CSMA-CA. | 31 |
| 2.3.8 Modelo de transferencia de datos. | 32 |
| 2.4 Principales simuladores de redes inalámbricas. | 34 |
| 2.4.1 Opnet modeler. | 34 |
| 2.4.2 NS2 – NS3. | 35 |
| 2.4.3 Omnet++. | 35 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.4.4 | Entorno de trabajo de Omnet++. | 36 |
| 2.4.5 | Frameworks desarrollados para Omnet++. | 37 |
| 3 | Método | 42 |
| 3.1 | Planteamiento del esquema de evaluación | 42 |
| 3.1.1 | Figura de mérito | 43 |
| 3.1.2 | Topología de red estudiada en las simulaciones | 44 |
| 3.1.3 | Estrategia de control centralizada | 45 |
| 3.1.4 | Parámetros generales programados en las simulaciones | 48 |
| 3.2 | Diseño de pruebas y simulaciones | 51 |
| 3.2.1 | Fase I: Primer grupo de pruebas. | 52 |
| 3.2.2 | Fase II: Desempeño de la red con un ciclo útil de 50% | 55 |
| 3.2.3 | Fase III: Desempeño de la red con un ciclo útil del 100% | 57 |
| 4 | Análisis de resultados | 57 |
| 4.1 | Fase I: Primer grupo de pruebas. | 57 |
| 4.1.1 | Variación de los parámetros BO y SO | 59 |
| 4.2 | Fase II: Desempeño de la red con un ciclo útil de 50% | 72 |
| 4.2.1 | Fase II.1: Desempeño del estándar aumentando el número de nodos. | 72 |
| 4.2.2 | Fase II.2 Desempeño del estándar aumentando la distancia entre los nodos y el coordinador: | 80 |
| 4.3 | Fase III Desempeño de la red con un ciclo útil de 100% | 85 |
| 4.3.1 | Fase III.1: Desempeño del estándar aumentando el número de nodos | 86 |
| 4.3.2 | Fase III.2: Desempeño del estándar aumentando la distancia entre los nodos y el coordinador. | 91 |
| 4.4 | Formalización de los análisis de resultados | 96 |
| 5 | Conclusiones | 98 |

Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Frecuencias de operación del estándar IEEE 802.15.4 | 25 |
| Tabla 2 Perfiles de simulación considerados | 48 |
| Tabla 3 Perfiles de simulación elegidos | 49 |
| Tabla 4 Factores de consumo de la batería de un transceptor CC1100 | 50 |
| Tabla 5 Configuraciones de las pruebas realizadas en la fase I | 53 |
| Tabla 6 Resultados de las pruebas del perfil 1, fase 1. | 63 |
| Tabla 7 Resultados de las pruebas del perfil 2, fase 1. | 63 |
| Tabla 8 Resultados de las pruebas del perfil 2 con un intervalo de envío de 1000 ms, fase 1. | 64 |
| Tabla 9 Resultados de las pruebas del perfil 4, fase 1. | 64 |
| Tabla 10 Resultados de las pruebas del perfil 5, fase 1. | 65 |
| Tabla 11 Resultados de las pruebas del perfil 5 con un intervalo de envío de 1000 ms, fase 1. | 66 |
| Tabla 12 Perfiles de simulación resultantes después de las pruebas de la fase I. | 67 |
| Tabla 13 Ponderación de los perfiles puestos a prueba en la fase I. | 70 |
| Tabla 14 Perfiles y configuraciones con los que se consiguió un mejor desempeño en la fase I. | 71 |
| Tabla 15 Resultados de las pruebas al perfil 1 de la fase II.1 | 74 |
| Tabla 16 Resultados de las pruebas al perfil 2 de la fase II.1 | 74 |
| Tabla 17 Resultados de las pruebas al perfil 2 con un intervalo de envía de 1 [s], fase II.1 | 75 |
| Tabla 18 Resultados de las pruebas al perfil 4 de la fase II.1 | 77 |
| Tabla 19 Resultados de las pruebas al perfil 5 de la fase II.1 | 77 |
| Tabla 20 Resultados de las pruebas al perfil 5 de la fase II.1 | 78 |
| Tabla 21 Configuración de los perfiles con los que se consiguió un mejor desempeño en la fase II.1. | 79 |

| | |
|---|----|
| Tabla 22 Resultados del perfil 2 a las pruebas de la fase II.2 con un intervalo de envío de 100 ms. | 81 |
| Tabla 23 Resultados del perfil 2 a las pruebas de la fase II.2 con un intervalo de envío de 1000 ms. | 81 |
| Tabla 24 Resultados del perfil 5 a las pruebas de la fase II.2 con un intervalo de envío de 100 ms. | 83 |
| Tabla 25 Resultados del perfil 5 a las pruebas de la fase II.2 con un intervalo de envío de 1000 ms. | 84 |
| Tabla 26 Perfiles y configuración para las pruebas de la fase III. | 85 |
| Tabla 27 Resultados del perfil 2 a las pruebas de la fase III.1 con un intervalo de envío de 100 ms. | 87 |
| Tabla 28 Resultados del perfil 2 a las pruebas de la fase III.1 con un intervalo de envío de 1000 ms. | 87 |
| Tabla 29 Resultados del perfil 5 con intervalo de envío de 100 [ms] fase III.1 | 89 |
| Tabla 30 Resultados del perfil 5 con intervalo de envío de 1000 [ms] fase III. | 90 |
| Tabla 31 Resultados del perfil 2 con intervalo de envío de 100 [ms] fase III.2 | 92 |
| Tabla 32 Resultados del perfil 2 con intervalo de envío de 1000 [ms] fase III.2 | 93 |
| Tabla 33 Resultados del perfil 5 con intervalo de envío de 100 [ms] fase III.2 | 95 |
| Tabla 34 Resultados del perfil 5 con intervalo de envío de 1000 [ms] fase III.2 | 95 |
| Tabla 35 Configuraciones recomendadas | 96 |
| Tabla 36 Resultados del estándar a las configuraciones recomendadas | 97 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 Esquema de una micro red eléctrica. Tomado de la primera edición de “Microgrid: architectures and control” (N. (IEEE) Hatziargyriou, 2014). | 19 |
| Figura 2 a) Esquema de generación y distribución de energía convencional b) esquema de bidireccional de distribución de energía. Tomada del artículo “Smart Grid: Las TICs y la modernización de las redes de energía eléctrica-Estado del Arte, 2011 (Díaz Andrade & Hernández, 2011). | 20 |
| Figura 3 Topologías estrella y punto a punto. | 23 |
| Figura 4 Arquitectura de un dispositivo LR-WPAN. Tomado de la norma del estándar IEEE 802.15.4 edición del 2006 “IEEE Standard for Telecommunications and information Local and metropolitan area networks — Specific requirements Part 15. 4” (IEEE/ComputerSociety, 2006) | 26 |
| Figura 5 Estructura de la supertrama sin GTS | 29 |
| Figura 6 Estructura de la supertrama con GTS, CAP, CFP y sin región inactiva. | 29 |
| Figura 7 Estructura de la supertrama (descripción completa) | 30 |
| Figura 8 Modelo de transmisión de datos desde un dispositivo hacia el coordinador con beacons habilitados. | 32 |
| Figura 9 Modelo de transmisión de datos desde el coordinador hacia un dispositivo con beacons habilitados. | 33 |
| Figura 10 Estructura de una LR-WPAN en Omnet++. | 38 |
| Figura 11 Esquema de la micro red eléctrica de prueba. | 46 |
| Figura 12 Esquema básico de un lazo cerrado de control | 47 |
| Figura 13 Descripción general de las fases y pruebas planteadas para las simulaciones. | 52 |
| Figura 14 Topología estrella centralizada diseñada para la fase I | 53 |
| Figura 15 Estructura de la supertrama para las pruebas de la fase I | 53 |

| | |
|---|----|
| Figura 16 Topología matricial diseñada para la fase II.1 | 55 |
| Figura 17 Topología diseñada para las pruebas de la fase II.2 | 56 |
| Figura 18 Estructura de la supertrama para las pruebas de la fase III | 57 |
| Figura 19 Resultados del perfil 1 fase I. | 59 |
| Figura 20 Resultados del perfil 2 fase I. | 60 |
| Figura 21 Resultados del perfil 4 fase I. | 61 |
| Figura 22 Resultados del perfil 4 fase I | 62 |
| Figura 23 Resultados de los perfiles 1 y 2 en las pruebas de la fase II.1 | 73 |
| Figura 24 Resultados de los perfiles 4 y 5 en las pruebas de la fase II.1 | 76 |
| Figura 25 Resultados del perfil 2 fase II.2 | 80 |
| Figura 26 Resultados del desempeño del perfil 5, fase II.2 | 83 |
| Figura 27 Resultados de las características de desempeño del perfil 2, fase III.1 | 86 |
| Figura 28 Resultados de las características de desempeño del perfil 5, fase III.1 | 89 |
| Figura 29 Resultados del desempeño perfil 2, fase III.2 | 92 |
| Figura 30 Resultados de desempeño perfil 5, fase III.2 | 94 |

Resumen

TITULO: EVALUACIÓN DEL ESTÁNDAR DE RED INALÁMBRICA IEEE 802.15.4 PARA LA TRANSMISIÓN DE DATOS UTILIZADOS EN UNA MICRO RED ELÉCTRICA*.

AUTORES: JHONYS FERNANDO VALLEJO ACEVEDO^o
IVÁN DAVID MENESES LÓPEZ^o.

PALABRAS CLAVE: MICRO REDES ELECTRICAS, IEEE802.15.4, COMUNICACIONES INALAMBRICAS, REDES INTELIGENTES.

DESCRIPCION:

La siguiente tesis de grado, tal y como su título lo indica, trata sobre la evaluación del estándar de red inalámbrica IEEE 802.15.4 para la transmisión de datos utilizados en una micro red eléctrica. Dicha evaluación se basó en una figura de mérito que prioriza los intereses de las comunicaciones en las microrredes y tiene en cuenta las características de desempeño fundamentales de una red inalámbrica tales como el throughput, la tasa de pérdida de datos, el retardo de transmisión punto a punto, la cantidad de datos recibidos satisfactoriamente, número de dispositivos, cobertura y el consumo de energía por paquete enviado satisfactoriamente para una tasa de mil paquetes enviados desde cada uno de los dispositivos finales al nodo coordinador. Por medio del simulador modular de eventos discretos Omnet++ y los frameworks disponibles para el estándar se diseñaron y simularon topologías con características propias de una micro red eléctrica basado en el tamaño de datos que estas manejan y con los resultados conseguidos se construyeron configuraciones para el adecuado desempeño de la red de comunicación en la micro red eléctrica y así dar una conclusión de lo viable que puede ser la aplicación e implementación de tecnologías basadas en el estándar IEEE802.15.4 en las micro redes eléctricas.

* Trabajo de grado

^o Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. Director: Juan David Bastidas Rodríguez. Doctor en ingeniería con énfasis en eléctrica y electrónica.

Abstract

TITLE: EVALUATION OF WIRELESS STANDARD IEEE802.15.4
FOR DATA TRANSMISSIONS USED IN MICROGRIDS

AUTORS: JHONYS FERNANDO VALLEJO ACEVEDO
IVÁN DAVID MENESES LÓPEZ.

KEYWORDS: MICROGRIDS IEEE802.15.4, WIRELESS COMMUNICATIONS,
SMARTGRIDS.

DESCRIPTION:

The following degree thesis, as indicated in its title, deals with the evaluation of the IEEE 802.15.4 wireless network standard for the transmission of data used in microgrids, this is based on a merit figure that prioritizes the interests of communications on microgrids and takes into account the fundamental performance characteristics of a wireless network such as the throughput, data loss rate, end to end delay, number of packages successfully received, number of devices, coverage and power consumption per packet sent successfully for an amount of one thousand packets sent from each of the final devices to the coordinator node, using the modular discrete event simulator Omnet ++ and the frameworks available for the standard IEEE 802.15.4, topologies with microgrids characteristics were designed and simulated based on the size of data handled, configurations for the optimum communication network performance in the microgrid were built with the results obtained, thus a conclusion was given about the feasibility of technologies based on IEEE802.15.4 standard application and implementation on microgrids.

* Bachelor Thesis

° Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. Director: Juan David Bastidas Rodríguez. Doctor en ingeniería con énfasis en eléctrica y electrónica.

Introducción

La generación, transporte y distribución de la energía eléctrica se encuentra en continuo cambio debido a la inclusión de las tantas alternativas que han surgido en los últimos años y que buscan crear sistemas más competitivos y eficientes para satisfacer la demanda, de esta forma, la investigación y la industria continuamente proponen ideas para incorporar a los sistemas de generación centralizados (en donde la energía eléctrica proviene en grandes cantidades y su distribución abarca grandes distancias) sistemas con varias fuentes de energías renovables (RES) cercanas a los usuarios finales. Las micro redes proponen un cambio en la generación, distribución y almacenamiento de la energía eléctrica en la que los consumidores y el medio ambiente resultan en beneficio, se fundamenta en el uso inteligente de la electricidad generada y gestionada localmente, en donde se puede hacer uso de las RES y de la red eléctrica pública de manera turnada o simultánea (N. (IEEE) Hatziargyriou, 2014). Las ventajas de implementar un sistema de este tipo para los consumidores, el medio ambiente y la economía son diversas, ya que se pretende hacer un uso eficiente de la energía controlando la calidad del suministro, creando sistemas eléctricos económicamente eficaces, sostenibles, con pocas pérdidas, con un alto nivel de garantía de abastecimiento y seguridad. Pese a todo ello la creación de una lógica eficiente que permita gestionar de forma adecuada la generación, transporte y distribución sólo puede realizarse bajo un sistema de control, los cuales continuamente están recibiendo y transmitiendo información a los demás elementos de la micro red, y es allí en donde nuestra investigación permite, por medio un caso de estudio, abordar los elementos de comunicación necesarios para una apropiada y económica transmisión y recepción de las variables relevantes para una estrategia de control en una micro red eléctrica.

Las distintas tecnologías de redes de comunicación actuales permiten un amplio campo de elección, pero en este trabajo de investigación se evaluó el estándar de comunicación IEEE 802.15.4.

La elección de la red de comunicaciones adecuada proviene del estudio de las micro redes eléctricas y los sistemas de comunicación inalámbricos los cuales tienen características que cumplen con los requisitos para el flujo de datos de una gran cantidad de sensores repartidos en un área, bajo este criterio se abordó un caso de estudio definido por el director y codirector en el que se pudo evaluar la viabilidad de implementar un sistema de comunicaciones bajo el estándar IEEE 802.15.4.

El caso de estudio se limitó a las condiciones ambientales del medio simulable en el software escogido, el cual fue Omnet++ 4.6 y sus frameworks INET 2.6 e IEEE802154INET-Standalone, la problemática se abordó diseñando escenarios de prueba, se planteó un modelo a partir del caso presentado en la literatura para luego comprender su comportamiento y verificar bajo propios criterios de evaluación el desempeño de la red y la viabilidad de la implementación de un sistema de comunicaciones de este tipo.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el estándar de comunicaciones IEEE 802.15.4 para la transmisión de los datos requeridos por una estrategia de control centralizada de una micro red eléctrica.

1.2 Objetivos Específicos

- Definir una estrategia de control centralizada para una micro red eléctrica.
- Identificar las acciones a simular, los tipos y tamaños de datos a enviar en la red IEEE802.15.4 según lo requiera la estrategia de control.
- Establecer los parámetros y métricas de evaluación del estándar IEEE 802.15.4 para la transmisión de los datos requeridos por la estrategia de control.
- Diseñar escenarios y pruebas para evaluar el desempeño del estándar IEEE 802.15.4 con los tipos y tamaños de datos requeridos por la estrategia de control.
- Desplegar escenarios y realizar pruebas para la evaluación del desempeño del estándar IEEE 802.15.4 en la transmisión de los datos requeridos por la estrategia de control.

2 Marco teórico

2.1 Micro redes eléctricas:

Las micro redes son de las últimas soluciones propuestas por la ingeniería a muchos problemas de generación, transmisión y distribución energética en un mundo que demanda calidad, seguridad, bajo costo y eficiencia cada vez más, su propósito es permitir acceso a la energía eléctrica de forma más ecológica, económica e inteligente. En general, una micro red es un sistema de generación eléctrica bidireccional que permite la distribución de electricidad desde los proveedores hasta los consumidores, incluyendo a las nuevas tecnologías de generación de energías renovables (RES) y las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), agregando a la red elementos generadores diferentes a la central energética del sistema de

suministro, elementos almacenadores y sistemas de medición inteligente, dándole la capacidad de autoabastecerse y operar de forma aislada cuando sea necesario, permitiéndose un suministro local confiable (N. (IEEE) Hatziargyriou, 2014).

2.1.1 Elementos de una micro red. Una micro red eléctrica se compone generalmente de fuentes de energía renovable como los paneles solares y turbinas eólicas, almacenadores como baterías de iones de litio y cargas rurales, residenciales y comerciales que en sí son los electrodomésticos o los elementos que consumen energía eléctrica, así como puede observarse en la Figura 1, generalmente en cada uno de estos elementos se instalan sensores o sistemas de monitoreo para dar seguimiento y control del flujo de potencia en la red.

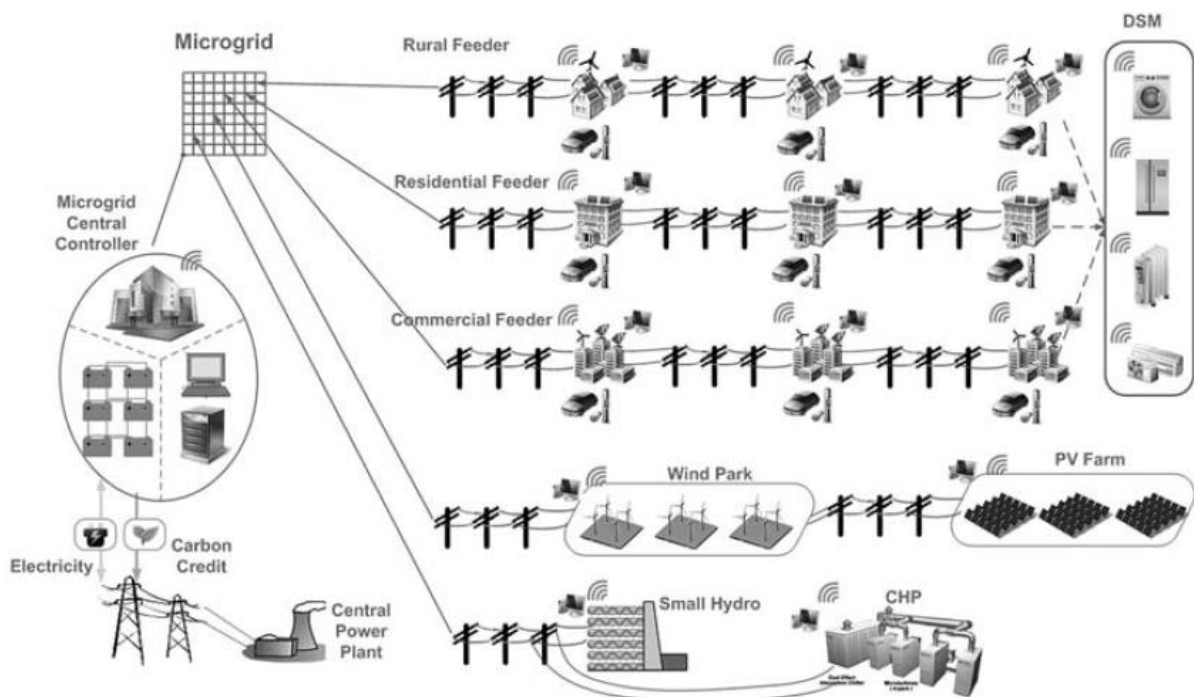


Figura 1 Esquema de una micro red eléctrica. Tomado de la primera edición de “Microgrid: architectures and control” (N. (IEEE) Hatziargyriou, 2014).

2.1.1.1 Fuentes de energía renovable. Las RES son un grupo amplio de dispositivos, máquinas y sistemas que transforman diferentes tipos de energía como la mecánica en electricidad, aprovechando factores del medio

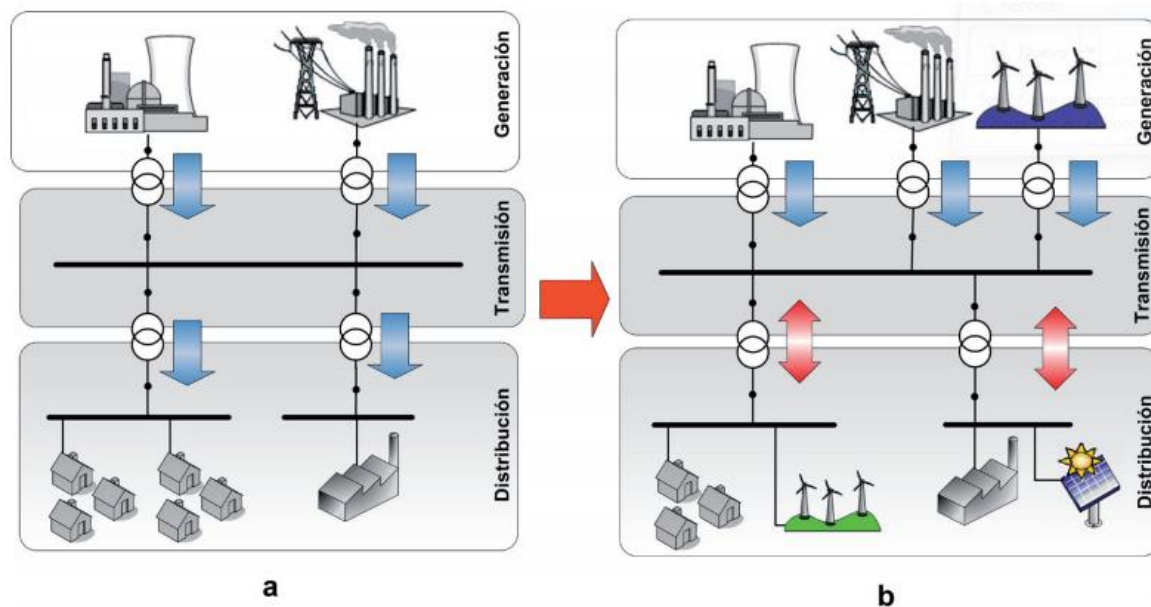


Figura 2 a) Esquema de generación y distribución de energía convencional b) esquema de bidireccional de distribución de energía. Tomada del artículo “Smart Grid: Las TICs y la modernización de las redes de energía eléctrica-Estado del Arte, 2011 (Díaz Andrade & Hernández, 2011).

ambiente como la luz solar, la velocidad del viento, las corrientes de agua entre otros. Pueden funcionar de forma autónoma y conectarse a la red principal, algunos ejemplos son los paneles solares y los generadores eólicos, la inclusión de estos elementos y las unidades de almacenamiento a la red de suministro público crea el paradigma bidireccional, el cual define un esquema como se puede ver en la Figura 2 que incorpora y aprovecha la capacidad de almacenamiento y generación distribuida, con un rol activo para los usuarios, en el que son capaces de proveer energía a otros usuarios e inclusive a la red principal.

2.1.1.2 Unidades de almacenamiento. las unidades de almacenamiento generalmente utilizadas en las micro redes son baterías de larga duración y capacidad, técnicamente, una unidad de almacenamiento podría comportarse bajo un paradigma de seguimiento de carga (aplicaciones de equilibrio), es decir como reservas de electricidad para ajustar la potencia de salida a medida que la demanda fluctúe, o bajo un paradigma de seguimiento de precios o de consumo (aplicaciones de arbitraje), por ejemplo en caso de querer cargar un auto eléctrico. Al mismo tiempo, las unidades de almacenamiento pueden equilibrar las reservas que van desde aplicaciones de corto plazo (milisegundos a nivel de minutos) a largo plazo (por hora a escala diaria). Específicamente, para tecnologías de almacenamiento basadas en DC (batería, supercondensador, etc.), una interfaz electrónica de potencia correctamente diseñada podría contribuir al equilibrio de la potencia reactiva del sistema sin incurrir en costos operativos (N. (IEEE) Hatziargyriou, 2014).

2.2 Redes inalámbricas de área personal de baja velocidad (LR-WPAN)

Una red LR-WPAN por sus siglas en inglés (low rate wireless personal área network) es un concepto que comprende redes de comunicación inalámbricas de bajo costo y consumo de potencia a cambio de baja velocidad de transmisión y corto alcance de operación pero que garantiza facilidad de instalación y confiabilidad en la transferencia de los datos bajo un protocolo simple y flexible (IEEE/ComputerSociety, 2006). Algunas características de una LR_WPAN son:

- Tasa de datos de 250 kb/s, 100kb/s, 40 kb/s y 20 kb/s.
- Redes que operan en topologías estrella o punto a punto.
- Direccionamiento de 16 o de 64 bits.
- Asignación opcional de ranuras de tiempo garantizados (GTS).

- Acceso múltiple por identificación de portadora con prevención de colisiones (CSMA-CA)
- Bajo consumo de potencia
- Detección del nivel de energía del canal (ED)
- Indicación de calidad de enlace.

2.2.1 Componentes de una LR-WPAN. La unidad básica de una red son los nodos, los cuales identifican un punto específico de la red, en cada uno se ubica un dispositivo, en una LR-WPAN basada en el estándar IEEE 802.15.4 existen dos tipos de dispositivos: los de función completa (FFD) y los de función reducida (RFD). Los FFD pueden operar en tres modos: como coordinador de una red de área personal (PAN), como coordinador o como dispositivo final. Un FFD puede comunicarse con RFDs y con otros FFDs mientras que un RFD solo puede comunicarse con un FFD. Los RFD son dispositivos finales encargados de aplicaciones simples, por ende, cuentan con limitados recursos. La asociación de dos o más dispositivos dentro del mismo canal físico conforman una red de área personal (WPAN), esta asociación debe contener al menos un FFD coordinador de la PAN (IEEE/ComputerSociety, 2006).

No existe una cobertura de área definida debido a que las características de propagación son dinámicas e inciertas, pequeños cambios en la dirección y posición de los nodos pueden resultar en diferencias drásticas en la señal, potencia y calidad del enlace de la comunicación.

2.2.2 Topologías. Una LR-WPAN basada en IEEE 802.15.4 puede operar tanto en una topología estrella como en una punto a punto, ambas se muestran en la Figura 3. En forma general, ambas topologías tienen las siguientes características:

- Todos los dispositivos tienen un punto de iniciación y otro de terminación de transmisión.
- El coordinador de la PAN puede ser usado como un nodo iniciador, terminador o como intermediario.

- El coordinador de una PAN puede asignar a los dispositivos direcciones largas de 64 bits o cortas de 16 bits.
- Las direcciones largas de 64 bits permiten realizar transmisiones directas dentro de la PAN
- Las direcciones cortas de 16 bits se usan para la asociación a la red de un dispositivo.

La topología estrella está construida a partir de un único coordinador PAN el cual es el controlador principal de la red y se encarga de la asociación de los nodos, dichos nodos pueden estar repartidos a diferentes distancias dentro del rango de transmisión del coordinador, si un nodo no está en dicho rango este no será asociado a la PAN, en dado caso es necesario asociar dicho nodo en otra PAN con otro coordinador. Algunas de las aplicaciones que usan una topología estrella son en la automatización del hogar y en centros de atención médica personalizada.

La topología punto a punto también tiene un único coordinador de la PAN, pero a diferencia de la topología estrella cualquier dispositivo puede comunicarse con otro siempre y cuando estos estén dentro de su rango de alcance, excepto en caso de que se trate de dos RFD. Esta topología permite la formación de redes más complejas de implementar, tales como las redes tipo mesh.

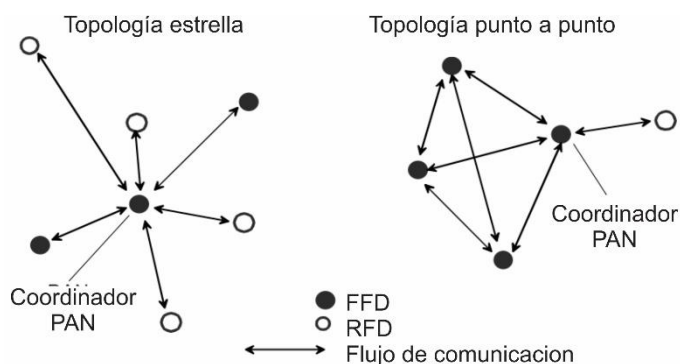


Figura 3 Topologías estrella y punto a punto.

En topologías que contienen varias PAN, cada PAN independiente selecciona una única identificación con la cual se permite que dispositivos de diferentes PAN se intercomunicen, el

mecanismo por el cual se asignan estas identificaciones de las PAN no corresponde al alcance del estándar IEEE 802.15.4 (IEEE/ComputerSociety, 2006).

2.2.3 Características de desempeño de una LR-WPAN. Las transmisiones en una red de comunicación inalámbrica tienen varias características medibles que permiten analizar su desempeño en base de su rendimiento, calidad, fiabilidad, eficiencia y velocidad, a continuación describiremos las características más importantes y usadas en aplicaciones industriales para analizar el rendimiento de las topologías en estrella basadas en el estándar IEEE 802.15.4 ((ZigBee Alliance), 2014).

2.2.3.1 *Throughput.* El throughput o velocidad efectiva de datos, se define como la cantidad de información entregada satisfactoriamente dentro de un rango de tiempo, en transmisiones de redes de comunicación suele promediarse el flujo de paquetes por segundo, en este documento se tratará de esa manera.

2.2.3.2 *Retardo punto a punto (End to end delay).* En las redes de comunicación el end to end delay o retardo punto a punto es el tiempo que toma un paquete de bits en transmitirse y ser recibido entre los puntos más lejanos de la red.

2.2.3.3 *Tasa de perdida de datos (Packet loss rate).* En una red de comunicación se define como perdida de datos cuando un paquete de información (como tramas de reconocimiento, carga útil, tramas de comandos, trama de beacons, etc.) se pierde en el proceso de transmisión y no llega a su destino, consecuentemente la tasa de perdida de datos o packet loss rate es el promedio de paquetes perdidos por segundo.

Adicional a estas características, el presente trabajo de grado basa sus análisis en el número de paquetes exitosos conseguidos en cada una de las transmisiones y la potencia consumida por el nodo coordinador.

2.3 Estándar IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 define la capa física (PHY) y la subcapa de control de acceso al medio (MAC) para redes inalámbricas de área personal y local de baja tasa de transmisión de datos (LR-WPAN, WLAN) de bajo costo y bajo consumo de energía.

Tabla 1 Frecuencias de operación del estándar IEEE 802.15.4

| Banda de frecuencia | Rango de frecuencias | Velocidad de datos | Número de canales | Modulación | Área geográfica |
|---------------------|----------------------|--------------------|--------------------|------------|--------------------|
| 868 MHz | 868 MHz | 20 kbps | 0 (1 canal) | BPSK | Europa |
| 915 MHz | 902-928 MHz | 40 kbps | 1-10 (10 canales) | ASK | América, Australia |
| 2400 MHz | 2405-2480 MHz | 250 kbps | 11-26 (16 canales) | O-QPSK | Mundo entero |

Una de las principales características de este estándar es que opera en las bandas de frecuencia reservadas internacionalmente para el uso no comercial de industria, ciencia y medicina (ISM), la Tabla 1 muestra más información sobre su desempeño en dichas bandas de frecuencia.

2.3.1 Arquitectura. La estructura del estándar de comunicaciones IEEE 802.15.4 está basado en el modelo de interconexión de sistemas abiertos (OSI), en donde cada capa es responsable de una parte del estándar y de proveer servicios a las capas superiores (UNICEN, 2009), un dispositivo de una LR-WPAN está comprendido por una capa física (PHY), la cual contiene el transmisor de radio frecuencias (RF) junto con un mecanismo de control de bajo nivel, y la sub capa MAC que proporciona acceso al canal físico para todos los tipos de transferencia, en la Figura 4 se muestra una representación que describe la estructura (IEEE/ComputerSociety, 2006).

Las capas superiores como se muestra en la Figura 4, corresponden a la capa de red y la capa de aplicación, cuya definición está fuera del alcance del estándar IEEE 802.15.4. Un control de enlace lógico (LLC) tipo 1 puede acceder a la subcapa MAC a través de la subcapa de convergencia específica de servicio (SSCS).

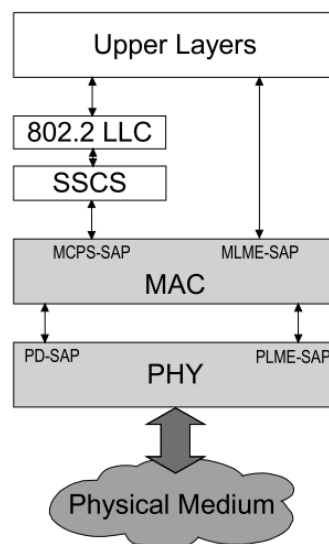


Figura 4 Arquitectura de un dispositivo LR-WPAN. Tomado de la norma del estándar IEEE 802.15.4 edición del 2006 “IEEE Standard for Telecommunications and information Local and metropolitan area networks — Specific requirements Part 15. 4” (IEEE/ComputerSociety, 2006)

Esta arquitectura puede ser implementada con dispositivos integrados o por medio de otros que requieran soporte externo como una computadora (IEEE/ComputerSociety, 2006).

2.3.2 Capa física (PHY). Las características y servicios de la capa física son la activación y desactivación de la radio transmisión, la detección de energía (ED), la indicación de calidad de enlace (LQI), evaluación de canal libre (CCA) y la transmisión y recepción de paquetes a través del canal físico. Como ya se ha mencionado la capa opera en varias bandas de frecuencia, algunas dependiendo de la ubicación geográfica donde se plantee la comunicación, las características de desempeño pueden verse en la Tabla 1.

2.3.3 Sub capa control de acceso al medio (MAC). Esta capa es la encargada de varios procesos relacionados con la gestión de los datos en las transmisiones, tales como la asignación de beacons, el acceso al canal, gestión de GTS, validación de la trama, entrega de la trama de reconocimiento, asociación y desasociación de dispositivos, adicionalmente esta subcapa provee enlaces para la implementación de mecanismos de seguridad.

2.3.4 Protocolo de evaluación de canal libre (CCA). El protocolo de evaluación de canal libre o CCA por sus siglas en inglés (Clear channel assessment) le permite identificar a todos los diferentes dispositivos de la red si el canal de transmisión esta libre u ocupado, por medio de tres diferentes modos:

- Modo CCA 1: detección de energía (ED), con este modo el protocolo CCA reportará que el canal está ocupado al detectar cualquier energía por encima de un umbral de -85 dBm.
- Modo CCA 2: sensado de portadora, con este modo el protocolo CCA reportará que el canal está ocupado solo después de la detección de una señal que cumpla con las mismas características de modulación y propagación definidas por la capa física. Esta señal puede estar por encima o por debajo del umbral de -85 dBm.

- Modo CCA 3: Sensado de portadora con detección de umbral de energía, en este modo el canal se reportará ocupado usando una combinación lógica OR entre los modos 1 y 2.

2.3.5 Tramas. Una trama es una secuencia de bits estructurada según el protocolo de la capa a la que pertenece, dicha secuencia corresponde de manera general a la información útil más la información de control necesaria para recibirla, las estructuras de las tramas en este estándar han sido diseñadas para ser mínimamente complejas y al mismo tiempo ser lo suficientemente robustas para transmitirse sobre un canal ruidoso, cada protocolo de capa se agrega a la estructura con encabezados y pies de trama específicos de la capa. Este estándar define cuatro estructuras de trama:

- Trama de beacon, utilizada por un coordinador para transmitir beacons.
- Tramas de datos utilizadas para todas las transferencias de datos.
- Tramas de confirmación o reconocimiento (ACK) utilizada para confirmar la recepción correcta de tramas.
- Tramas de comando MAC, que se utiliza para el manejo de todas las transferencias de control de la entidad MAC en cada punto de la red.

2.3.6 Estructura de la supertrama. La supertrama es una estructura que plantea un orden en la comunicación entre un coordinador y los nodos asociados a su PAN, en este estándar la estructura de la supertrama es opcional y es definida por el coordinador, esta equitativamente dividida en 16 ranuras de tiempo y delimitada por una trama beacon la cual siempre es transmitida en la primera ranura tal como se muestra en la Figura 5, la trama de beacon es usada para sincronizar los dispositivos adjuntos, identificar la PAN y describir la estructura de la supertrama, esta puede ser enviada sin el uso del mecanismo CSMA-CA.

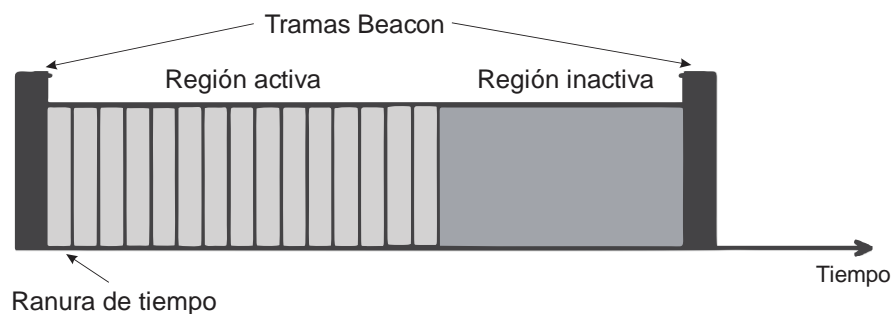


Figura 5 Estructura de la supertrama sin GTS

Opcionalmente la supertrama puede tener una región activa y otra inactiva en donde el coordinador entra en un modo de bajo consumo (Figura 5). Si no se desea usar una supertrama para las transmisiones basta con solo desactivar la trama de beacon.

Dentro de la supertrama existen los periodos de contención de acceso (CAP) y el libre de contención (CFP), durante el CAP los dispositivos que deseen transmitir deben competir por el canal usando el mecanismo de acceso múltiple por identificación de portadora con prevención de colisiones (CSMA-CA). La CFP es opcional y se usa para aplicaciones de baja latencia o donde los datos requieren de un ancho de banda específico, solo en la CFP el coordinador puede asignar hasta siete ranuras garantizadas de tiempo o GTS, cada dispositivo que transmita durante el GTS asignado debe asegurar que su transacción terminará antes del siguiente GTS o del final de la CFP, el uso de GTSs es opcional por ende la CFP también, véase la Figura 6.

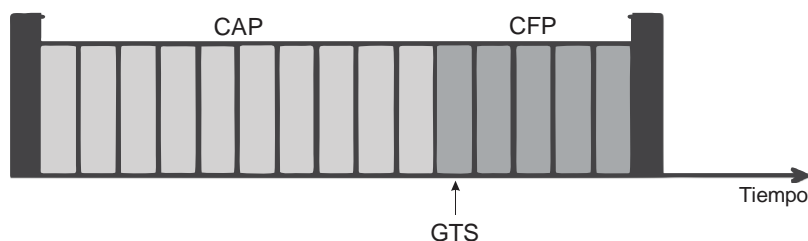


Figura 6 Estructura de la supertrama con GTS, CAP, CFP y sin región inactiva.

Existen dos valores que describen la estructura de la supertrama, estos son el orden del beacon (BO) y el orden de la supertrama (SO), el BO define los tiempos en el cual el coordinador debe

transmitir las tramas de beacon, a este tiempo se le llama intervalo de beacons (BI), el BO y el BI están relacionados como sigue:

$$\text{Para } 0 \leq BO \leq 14, \quad BI = \text{DuracionBaseSupertrama} * 2^{BO} \text{ [Simbolos]}$$

Si BO es igual a 15 el coordinador no transmitirá beacon sin importar que valor tenga SO a menos que algún nodo le envíe un comando de solicitud de beacon.

El SO define el tamaño de la región activa de la supertrama, el cual incluye la trama de beacon, así mismo como el BO está relacionado con el BI, el SO se relaciona con la duración de la supertrama (SD):

$$\text{Para } 0 \leq SO \leq BO \leq 14, \quad SD = \text{DuracionBaseSupertrama} * 2^{SO} \text{ [Simbolos]}$$

Si BO y SO son iguales no habrá región inactiva dentro de la supertrama, las variaciones de estos dos parámetros influyen mucho en consumo de potencia, frecuencia de envíos de datos, la velocidad de transmisión y también en la tasa de pérdida de datos lo cual se ve reflejado en el éxito de las transmisiones.

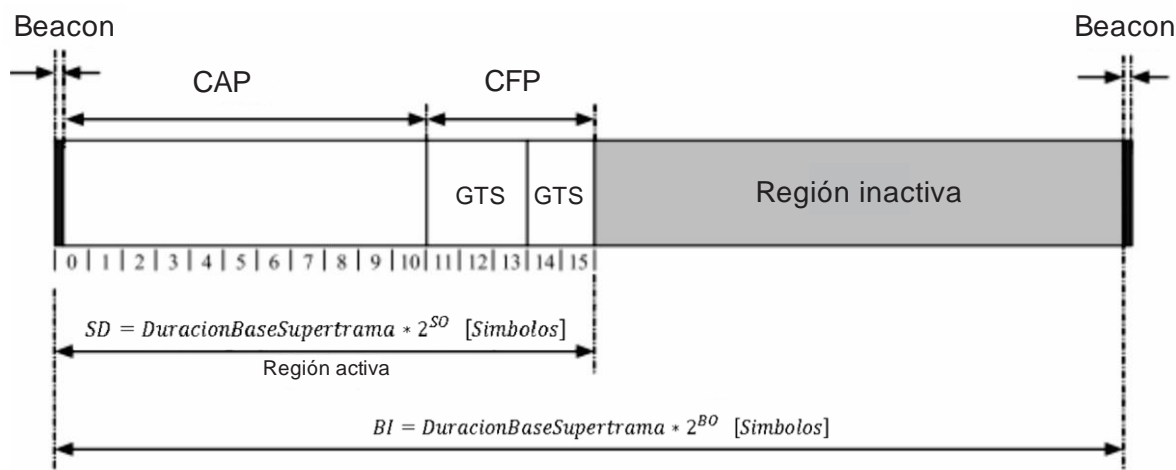


Figura 7 Estructura de la supertrama (descripción completa)

2.3.7 Mecanismo CSMA-CA. En las implementaciones de redes de comunicaciones inalámbricas nos encontramos que varios dispositivos comparten el mismo medio físico o canal, por lo tanto, puede ocurrir que dos o más dispositivos transmitan simultáneamente llegando a incurrir en colisiones. Este evento no es bueno para la calidad del servicio de la red. El protocolo de acceso múltiple por sensado de portadora o CSMA por sus siglas en inglés (carrier sense multiple access) se diseñó para que los nodos antes de enviar información revisen el canal para identificar si existe una transmisión en curso detectando si hay o no portadora, de esta manera el nodo no transmite hasta que encuentre el canal desocupado. Entre las distintas variantes basadas en el protocolo CSMA, el estándar IEEE 802.15.4 hace uso del protocolo CSMA/CA el cual es un método de acceso múltiple que permite un tiempo de espera aleatorio al detectar la señal portadora del medio físico del canal para evitar colisiones.

En el estándar existen dos modos de mecanismos por los cuales el protocolo CSMA/CA puede acceder a los canales, el modo CSMA/CA sin ranurar y el ranurado, el primero utilizado cuando las tramas de beacon no se encuentran habilitadas, por ello cada vez que un dispositivo quiera comunicarse debe esperar un tiempo aleatorio (no medido por las ranuras de tiempo de la super trama) y verificar previamente que el canal se encuentre libre, en caso de estar ocupado, el dispositivo debe esperar un tiempo aleatorio más para volver a verificar el estado del canal. El mecanismo de CSMA/CA ranurado sólo funciona cuando las tramas de beacon se encuentran habilitadas y durante el CAP, funciona de igual manera que el modo sin ranuras, pero los tiempos de espera son medidos según la duración mínima de las ranuras de la supertrama, de esta forma lo mínimo que debe esperar el dispositivo para buscar si el canal está libre es la duración de una ranura. Sin importar el mecanismo que se utilice, la transmisión y recepción de tramas de beacon y reconocimiento ACK se hacen sin utilizar el método CSMA/CA ((ZigBee Alliance), 2014).

2.3.8 Modelo de transferencia de datos. Existen tres modelos de transferencia de datos, el primero es en el que un dispositivo transmite al coordinador, en el segundo el coordinador transmite a los dispositivos y en el último es en el que un dispositivo transmite a otro no coordinador, en la topología estrella solo se usa los dos primeros modelos mientras que en una punto a punto se usan todos, esta tesis de grado está enfocada en una topología estrella por lo que en esta sección se limitará a mostrar los dos primeros modelos de transferencia de datos mencionados.

2.3.8.1 Hacia el coordinador. Cuando un dispositivo desea enviar datos a un coordinador en una red con trama de beacon habilitada, este primero espera por la trama de beacon para sincronizarse con la estructura de la supertrama, en el momento apropiado el dispositivo transmite su paquete de datos al coordinador usando el mecanismo CSMA-CA ranurado, opcionalmente el coordinador puede responder con una trama de reconocimiento si la transmisión ha sido exitosa. Ver Figura 8.

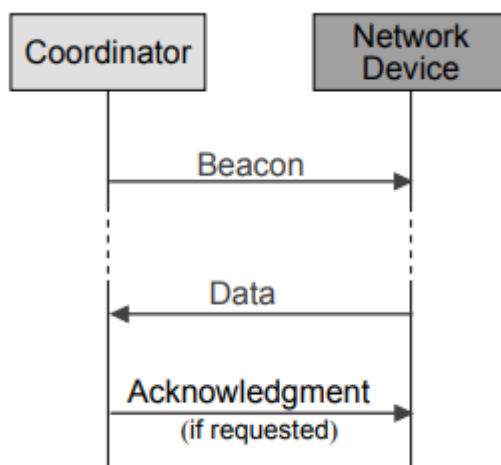


Figura 8 Modelo de transmisión de datos desde un dispositivo hacia el coordinador con beacons habilitados.

Cuando el coordinador no tiene habilitado el envío de beacons y la supertrama no se usa, el modelo de transmisión es igual al anteriormente mostrado, pero los dispositivos compiten entre ellos para enviar por medio del mecanismo CSMA-CA no ranurado.

2.3.8.2 Desde el coordinador. Cuando el coordinador desea transmitir un paquete de datos a un dispositivo, este le avisa al dispositivo por medio de la trama de beacon que desea transmitirle un paquete, luego el dispositivo recibe los datos de beacon, lee dicha solicitud y espera el momento apropiado para solicitar los datos que el coordinador le desea enviar, el coordinador responde con una trama de reconocimiento a la solicitud y luego envía el paquete, opcionalmente el dispositivo puede responder transmitiendo una trama de reconocimiento si la transmisión de los datos ha sido exitosa, una vez terminada la transmisión, dentro de la lista de la trama de beacons se limpiarán las solicitudes hechas. Ver Figura 9

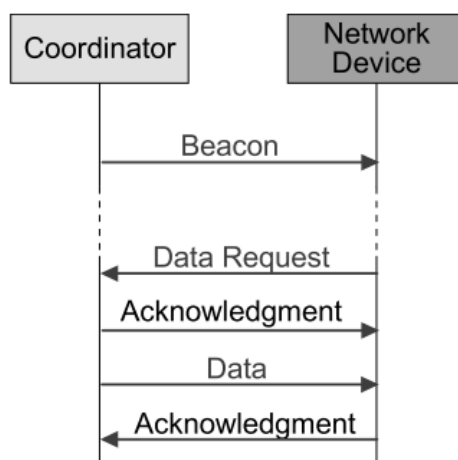


Figura 9 Modelo de transmisión de datos desde el coordinador hacia un dispositivo con beacons habilitados.

Cuando la red está configurada sin los beacons habilitados el modelo se diferencia del anterior mostrado en que el coordinador en vez de solicitar el envío hacia el dispositivo, es el dispositivo el que continuamente le está enviando solicitudes al coordinador si existe algún paquete que le quiera enviar, en dado caso las transmisiones se hacen usando el mecanismo CSMA-CA no ranurado (IEEE/ComputerSociety, 2006).

2.4 Principales simuladores de redes inalámbricas.

En muchos casos y en especial para el desarrollo e implementación real de redes inalámbricas se requiere de invertir mucho tiempo y dinero, con el fin de disminuir los costos y el tiempo de desarrollo se optó por un entorno de simulación para presentar de una forma simple y eficaz la información sobre la viabilidad y funcionamiento de una red que haga uso del estándar IEEE 802.15.4. En esta sección se abordarán las necesidades que llevaron a elegir un simulador como el apropiado para realizar las distintas pruebas de desempeño en cada uno de los escenarios para nuestros casos de estudio, justificando por qué se adaptó mejor a nuestras necesidades.

2.4.1 Opnet modeler. Opnet (Optimized Network Engineering Tool) fue creado por investigadores y estudiantes del Instituto de tecnología de Massachussets en el año 1984, Se trata de un entorno de simulación y modelado capaz de permitir el estudio, análisis y creación de redes de comunicaciones, protocolos, dispositivos y estándares.

Su habilidad para reaccionar y adaptarse a los cambios de crecimiento de las redes sin perder calidad ni flexibilidad permiten a los usuarios confianza en sus procesos de investigación y desarrollo, es una herramienta muy útil que concede la programación de nuevos módulos escritos en C. Su mayor inconveniente radica en su alto costo, además de la necesidad de añadir un módulo de redes inalámbricas para Opnet Modeler no incluido en el software base para poder realizar las simulaciones de sistemas de comunicaciones inalámbricas, otro problema adicional es la falta del modelo IEEE 802.15.4 el cual no está incluido en el módulo anteriormente mencionado, afortunadamente existe una solución en la red la cual es gratuita, este módulo es desarrollado de forma independiente por lo cual no se da soporte ni garantía del funcionamiento, es por este motivo y su alto costo que quedó descartado el uso de este entorno de simulación.

2.4.2 NS2 – NS3. NS (the network simulator) es un simulador de eventos discretos muy utilizado en las investigaciones y en las actividades de docencia, fue de los primeros paquetes de software compatibles con el estándar IEEE 802.15.4, tiene una gran cantidad de artículos, documentación y tutoriales que permiten comprender el funcionamiento del entorno de simulación sin problemas, Ofreciendo además la posibilidad de ser de código abierto y de libre distribución, tiene la ventaja de ser escrito en C++ con una extensión de TCL el cual sirve para ejecutar los scripts, el módulo de uso del estándar se encuentran en la red a disposición de cualquiera, este está basado en códigos ya existentes para OMNET++, es por esto junto con la recomendación de los directores que se desestimó el uso de este software de simulación.

2.4.3 Omnet++. Omnet++ (Objective Modular Network Test bench in C++) es un simulador de eventos discretos orientado a objetos muy popular entre la comunidad científica y universitaria, este simulador tiene una arquitectura jerárquica en donde sus modelos implementados están basados en C++, su mayor ventaja proviene al ser de código libre permitiendo crear y añadir librerías o modificar las existentes según sean las necesidades de cada proyecto, su simple entorno gráfico lo hace muy intuitivo y amigable, siendo este mucho más fácil de utilizar que el NS, otro punto favorable para este software es su rápida ejecución de código sumada a su gran comunidad de usuarios que le brindan soporte día a día, este software posee una estructura modular donde no es necesario un profundo entendimiento de cada uno de los módulos involucrados en la simulación, sólo se requiere conocer cómo ocurre la comunicación entre ellos, ante las notables facilidades de uso y gran soporte se optó por elegir este software como el entorno de simulación más conveniente.

2.4.4 Entorno de trabajo de Omnet++. Cualquier modelo de Omnet++ está conformado por un conjunto de módulos relacionados entre sí que comparten ciertas características pero en donde se distingue un grado de relevancia, esto permite demostrar que existe jerarquía entre ellas, pero sin importar el orden de relevancia todas se pueden comunicar mediante mensajes, el vínculo que se genera entre módulos se concreta utilizando un lenguaje propio del simulador, este lenguaje llamado NED permite la simplicidad del flujo de información lo cual favorece al entorno modular por el cual fue diseñado.

El paquete de simulación permite realizar sus acciones programadas bajo dos entornos, uno visual, totalmente gráfico llamado Tkenv y otro a través de una serie de comandos de nombre Cmdenv, la ejecución del modo gráfico realiza las simulaciones paso a paso identificando el destino de los mensajes y las acciones involucradas en los dispositivos de la red, incluso permitiendo conocer el sentido del flujo de información, este modo de simulación admite tres tipos de visualización en el tiempo (normal, rápida y exprés) cada una con una velocidad de procesamiento más rápida que la anterior, conocer el funcionamiento visual permite aprender más del estándar e identificar su funcionamiento, ya luego de realizar este proceso enteramente académico es preferible utilizar el modo Cmdenv el cual suele ser mucho más veloz.

El entorno gráfico Tkenv puede ser de gran utilidad en las primeras fases de cualquier proyecto, algunas características de este modo son:

- Presenta los resultados de la simulación durante el tiempo que se realice.
- Ejecuta cada una de las acciones paso a paso.
- Permite visualizar los mensajes en una ventana independiente en tiempo real

2.4.5 Frameworks desarrollados para Omnet++.

2.4.5.1 *MiXim.* Es un framework de simulación totalmente adaptado a Omnet++ en donde podremos simular redes inalámbricas móviles y estacionarias, sus modelos se basan en la propagación radio, estimación de la interferencia de las condiciones ambientales, consumo energético de los transceptores de los nodos y una variedad de protocolos MAC de los distintos estándares de comunicaciones inalámbricas, este framework dirige todo su interés a un conjunto de protocolos de las capas inferiores del modelo OSI, dándole importancia a las capas MAC y Física, justo por ese fin ofrece modelos precisos de la propagación de las ondas de radio, consumo energético de nodos, estimación de las diferentes interferencias que pueden ocurrir en la capa Física y MAC.

2.4.5.2 *Inetmanet.* Inetmanet es un framework con el que se puede simular redes de comunicaciones, su gran capacidad para hacerlo proviene de ser un empalme del framework INET.

INET es considerado el framework por defecto de Omnet++, en su poder se tiene diferentes protocolos de internet como lo son UDP, TCP, SCTP, IP, IPv6, MPLS, OSPF entre otros, también cuenta con protocolos de capa de enlace cableada e inalámbrica como lo son Ethernet, PPP y 802.11 estos conjuntos de facilidades son aprovechadas por otros frameworks ya sea para ahorrar tiempo en su desarrollo o por su alto grado de efectividad.

El equipo de desarrollo de INETMANET conociendo la existencia de los modelos de simulación para NS-2 y OPNET decidió construir uno que estuviera conforme a las indicaciones descritas en la versión del estándar IEEE 802.15.4 en su revisión del 2006, el modelo que será descrito consistió en una pila de protocolos basados en IEEE 802.15.4-2006 y dos módulos independientes del protocolo que se encargasen de medir la energía de los nodos transceptores y su movilidad (Chen, Wang, Falko, & German, 2009).

A continuación, se presentarán brevemente la funcionalidad de módulo junto con información relevante:

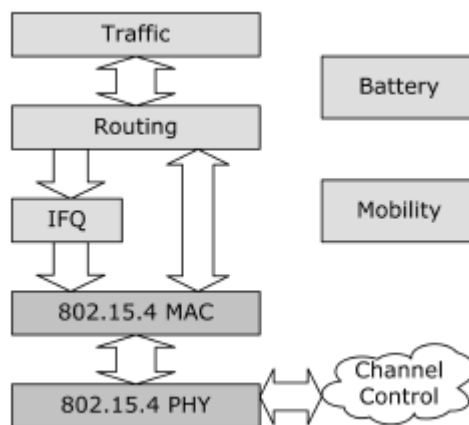


Figura 10 Estructura de una LR-WPAN en Omnet++.

2.4.5.2.1 Módulos PHY y MAC. Estos dos módulos son el núcleo del modelo de simulación quienes fueron estrictamente conformados según las indicaciones del estándar en su revisión del 2006, en ellos fueron implementadas las siguientes funciones.

- Tres estados de conmutación de radio (receptor encendido, transmisor encendido, y apagado) esto facilitó primitivas en las capas física y MAC, lo que finalmente influyó a la creación de un modelo de estados de trabajo de cuatro fases (desocupado, inactivo, recibiendo y transmitiendo) cuyo propósito es cumplir la medición de la energía en los nodos y la detección de la portadora en el canal.
- Transmisión y recepción de paquetes con detección a colisiones.
- Se implementó los protocolos de detección de energía (ED-Energy detection) y evaluación de canal libre (CCA-Clear Channel Assessment)
- Se implementó modelos de canal ideal o con pérdidas soportando incluso el cambio de canal.

En el modelo de la capa MAC, se concentraron en las distintas funciones de transferencia de datos y flujo de información en la red.

- Se hace uso de modelos de CSMA-CA ranurados y sin ranura.
- Se creó los modos de baliza o sin baliza.
- Se implementó los modelos de transferencia de datos Directa, indirecta y el modo GTS.
- Se incluyó la asociación entre coordinadores

2.4.5.2.2 Módulo IFQ. Debido a que el estándar sólo se basa en gestionar protocolos entre las capas física y MAC no hay ninguna descripción específica para las capas superiores, por este motivo el tamaño del buffer de la capa MAC ha sido agregado como un módulo de interfaz de fila (IFQ-interface queue) el cual es representado como una fila FIFO que es capaz de almacenar una cantidad de paquetes de datos provenientes de las capas superiores cuyo tamaño el usuario define y los envía a la MAC.

2.4.5.2.3 Módulo de enrutamiento. Soporta el reenvío de paquetes en una topología en estrella descrita en el estándar, es de vital importancia entender que sólo este módulo fue diseñado para una topología en estrella de una conexión PAN básica.

2.4.5.2.4 Módulo de tráfico. Este módulo permite que cada uno de los nodos generen tráfico o lo reciban, siendo lo más parecido a la capa de aplicación en una red con una implementación real del estándar, se puede configurar bajo una tasa de bits constante (CBR-Constant bit rate), el envío de paquetes ON-OFF y tráfico distribuido exponencialmente, estos paquetes estarán contruidos bajo una flexible estructura de programación XML.

2.4.5.2.5 Módulos de batería y movilidad. El módulo de batería permite una medición en tiempo real de los estados de consumo energético en cada uno de los nodos durante el tiempo de simulación, este módulo cuenta cuanto tiempo ha gastado cada transceptor en los cuatro estados

o fases de trabajo anteriormente explicadas para así calcular el consumo de energía y mostrar el nivel de energía restante de la batería, con los datos anteriores podemos fácilmente calcular o estimar la cantidad de vida útil de la batería en los dispositivos.

Este módulo en especial depende de las mediciones de energía para la radio CC1000 en mica2, pero sin embargo puede adaptarse de forma muy sencilla a otros tipos de hardware si se proporcionan las medidas exactas en el código de programación.

Por su parte el módulo de movilidad permite la simulación estática y dinámica, en donde los nodos pueden estar distribuidos en una posición especificada por el usuario, o un lugar aleatorio dentro de un área de trabajo específica.

2.4.5.3 IEEE 802.15.4 INET-Standalone. El estándar IEEE 802.15.4 especifica una pila de protocolos para la capa Física y MAC para el uso de redes inalámbricas LR-WPANs pero la mayoría de los frameworks consultados para la realización de la investigación estaban limitados a versiones antiguas que ya habían perdido su soporte en la mayoría de casos, esto llevó a la necesidad de buscar una versión más reciente de un entorno de simulación basado en Omnet++ que permitiera hacer un estudio más detallado con versiones más recientes del simulador, como mejor alternativa se encontró el framework “IEEE 802.15.4 INET-Standalone” desarrollado por PhD. Michael Kirsche y PhD Matti Schnurbusch en la Universidad Brandenburg University of Technology (BTU) Cottbus en Senftenberg, Alemania.

Si bien ya se tiene conocimiento de otros modelos desarrollados para el estándar IEEE 802.15.4 en su revisión del 2006, tales como INETMANET, MiXiM y Castalia. La razón que motivó al desarrollo de una nueva implementación basada en INET en su versión 2.x proviene de las diferentes limitaciones que los modelos ya nombrados nunca lograron corregir, MiXiM 802.15.4 se concentraba en la capa física con una implementación del estándar 802.15.4a en sus modelos de impulso de banda ultra ancha (IR-UWB), además de una versión de banda estrecha,

lastimosamente la capa MAC sólo se limitaba a cubrir algunas funcionalidades básicas del modelo CSMA-CA, por otro lado la implementación de Castalia incluye un extenso modelo de la capa física y muchas funciones de la capa MAC, pero estas funciones no pueden ser aprovechadas por la falta de protocolos de las capas superiores para aplicaciones de internet tales como: IPv6, TCP y UDP indispensables para la simulación de escenarios IoT, sin nombrar que no trae un modo balizado y se limita su uso a versiones antiguas de Omnet++. Por último, INETMANET incluye un modelo de 802.15.4 el cual es una adaptación para Windows de la implementación ya hecha en Omnet++ 3.4b la cual es incompleta y muchas funcionalidades de la capa MAC y física no fueron incluidas.

La composición de este modelo será nombrada a continuación:

- IEEE802.15.4Radio: Este módulo es una adaptación del módulo incluido en INET de nombre “Abstract Radio Class” el cual incluye ajustes del modelo de radio de la capa física para incluir la detección de energía (ED) y la evaluación de canal libre (CCA).
- IEEE802.15.4PHY: En ella se maneja el intercambio de mensajes que ocurren entre las Capas física (en especial la interfaz de radio) y MAC.
- IEEE802.15.4MAC: En ella se proporcionan las funciones de CSMA-CA, GTS, beacons y administración WPAN.
- SCS/StdLLC: En ambas se manejan las capas superiores de un sistema de comunicaciones inalámbricas que involucre el estándar, el módulo SCS es usado en el estándar IEE802.2 el cual permite darle forma a los datos que son transferidos en la red, siendo responsable del enlace Lógico (LLC), el entramado, manejo de cualquier error que eventualmente puede ocurrir y el direccionamiento de la red, por otro lado el módulo standartLLC permite realizar la conversión de los mensajes en aplicaciones que no sean compatibles con IEE802.2

3 Método

3.1 Planteamiento del esquema de evaluación

Basado en los conocimientos del estándar IEEE 802.15.4-2006, las micro redes eléctricas y los sistemas de comunicaciones inalámbricas en general, se plantearon distintas alternativas de estudio para la transmisión de datos en una micro red eléctrica, la cual está basada en una infraestructura de comunicaciones inalámbricas y busca verificar que se cumpla con los requisitos mínimos de desempeño y confiabilidad. En esta sección se expondrán las ideas con las que se diseñaron las diversas pruebas de rendimiento, el planteamiento se basa en diferentes criterios que ponen a prueba los límites de los protocolos de la capa física y MAC, tales criterios se mencionarán a continuación:

- El protocolo CSMA/CA permite la prevención de colisiones transmitiendo sólo cuando el canal está libre, este fue creado para evitar dos efectos que ponen en riesgo la comunicación, estos son llamados “los nodos ocultos” y “los nodos expuestos”, todas nuestras pruebas tienen en cuenta este hecho y basaron su distribución espacial de nodos RFD en consideración con lo anterior mencionado.
- El protocolo CCA tiene 3 semejantes modos de operación cada uno con características que pueden programarse a criterio del diseñador, en nuestras simulaciones se puso a prueba cada uno para identificar cuál de ellos se desempeña de la mejor forma, beneficiando y priorizando aquel que tenga los mejores resultados.
- El estándar permite la manipulación del ciclo útil a disposición del diseñador de la red, debido a que en ninguno de los estudios y artículos consultados se hace mención directa de la importancia o relevancia del ciclo útil con los tamaños y tráfico de la red, nuestras pruebas consideraron la importancia de este parámetro en cada uno de los aspectos relevantes para una red de comunicación inalámbrica.

- Es posible programar el uso de tramas de acknowledgement (ACK) o de reconocimiento, con nuestras simulaciones se puso a prueba que tanto influye esta característica y se verificó si es viable o no utilizarla.

en cada una de las pruebas y casos que se diseñaron en el entorno de simulación se tuvo en cuenta la integración de todos estos criterios para lograr analizar qué tan rentables, seguras, confiables y sostenibles pueden llegar a ser, dicho esto se requirió la evaluación de 5 características de desempeño:

- El número de paquetes de tramas de datos recibidos satisfactoriamente.
- La energía consumida por cada paquete enviado desde los nodos RFD hacia el coordinador de red.
- Los paquetes perdidos durante la comunicación de cada una de las pruebas.
- El retardo punto a punto de un solo paquete transmitido desde el nodo hacia el coordinador.
- Throughput o el promedio de cargas medidas en bytes o bits recibidas por el nodo coordinador por unidad de tiempo.

Las pruebas caracterizan el uso del estándar de comunicaciones inalámbricas en una micro red eléctrica, permitiendo así que no sólo nuestro estudio se base en la viabilidad, sino también en ser una guía para el diseñador de una red de comunicaciones en este tipo de aplicaciones.

3.1.1 Figura de mérito. La identificación de los perfiles con mejor desempeño se ha hecho por medio de la ponderación de cada una de las características de desempeño estructurados en una figura de mérito, la cual puede verse a continuación:

$$PONDERACION = \left(\frac{Eficiencia}{100} \right) * 35 + \left(\frac{E2EDelay_{min}}{E2EDelay} \right) * 30 + \left(\frac{Consumo_{min}}{Consumo} \right) * 20 + \left(\frac{0,05}{PacketLossRate} \right) * 5 + \left(\frac{Throughput}{Throughput_{max}} \right) * 10$$

Esta figura de mérito está planteada para dar una valoración superior a los perfiles que se desempeñan con buenos resultados de eficiencia y retardo punto a punto los cuales son las características de mayor importancia para los sistemas de control en las micro redes eléctricas.

3.1.2 Topología de red estudiada en las simulaciones. Debido a que en una micro red eléctrica la estructura que gobierna la distribución de los dispositivos DER, cargas y baterías depende enteramente de varios factores como la densidad poblacional hasta posibles regulaciones del país donde se quiera implementar una micro red, es probable encontrar tres tipos de distribución topológica de los nodos RFD y coordinadores PAN.

3.1.2.1 Topología en estrella urbana. En este tipo de topología se da una concentración de nodos RFD en un área cerrada determinada, usualmente en un solo gabinete de medición, Es una topología muy típica empleada en lugares en edificaciones dentro de las ciudades, para estos casos las conexiones se hacen cableadas con enlaces B-PLC.

3.1.2.2 Topología en estrella rural. Dista mucho de la topología mencionada anteriormente, en ella podemos tener los nodos RFD en sus gabinetes por separado, aunque conociendo que la distancia en que se separa cada uno de ellos no es sustancial, esta topología es idónea en viviendas familiares de población no muy grande.

3.1.2.3 Topología en estrella aislada. Es muy semejante a la topología anterior, pero en ella las distancias entre cada medidor o nodo RFD es importante, esta topología es típica entre fincas o poblaciones de muy baja densidad.

Teniendo en cuenta estas consideraciones la topología que se decidió estudiar permitió el uso de las comunicaciones inalámbricas en distancias para las cuales fue diseñado el estándar, debido a ello en todos los casos de estudio asumiremos que la representación estructural y distribución de nodos se hará bajo un entorno rural.

3.1.3 Estrategia de control centralizada. Los sistemas de comunicaciones inalámbricas en las micro redes eléctricas se concentran en el acceso en tiempo real de la información del consumo, las pérdidas, el flujo de energía y en algunos casos la facturación de cada uno de los usuarios, se comprende que en condiciones normales de funcionamiento los recursos energéticos distribuidos (DER), las cargas y baterías se comuniquen de forma bidireccional con la central de control maestro (CCM), con el fin de seguir cada una de las indicaciones programadas por el esquema de control, cada uno de estos dispositivos está dotado por un nodo RFD el cual recolecta y envía la información relevante para la debida gestión de control, por consiguiente cada uno de estos parámetros de información viaja de forma determinística para luego finalizar en unas series de instrucciones de activación/desactivación en las fuentes DER, Conexión/desconexión en las cargas y carga/descarga de las baterías.

Normalmente el flujo de información viaja desde los nodos RFD hacia la central de control maestro bajo una infraestructura de comunicaciones cableada sobre la línea de potencia (PLC, Power Line Communication) o bajo enlaces inalámbricos utilizando tecnologías como zigbee (802.15.4-2006) homeplug, 6LoWPAN, Z-Wave, Lora entre otros, bajo los criterios mencionados se buscó que cada uno de los escenarios estudiados tuvieran una distribución real de sensores en una implementación de una micro red eléctrica teniendo en cuenta que cada nodo RFD se comunicará con la central de control maestro buscando seguir indicaciones del esquema de control programado.

3.1.3.1 Tamaño y tipo de información. Para establecer el tamaño en bytes de los paquetes de datos correspondientes a las variables que el sistema de control necesita se estableció que todas estas están en valores reales decimales según el formato IEEE, de manera que cada valor puede escribirse en 4 bytes y se desea poder transmitir 7 variables por lo tanto el tamaño neto de los paquetes de información corresponden a 28 bytes, estas siete variables son: potencia activa (P), potencia reactiva (Q), frecuencia (F), magnitud de la tensión en la línea (|V|), potencia máxima (Pmax), potencia mínima (Pmin) y una variable libre de 4 bytes.

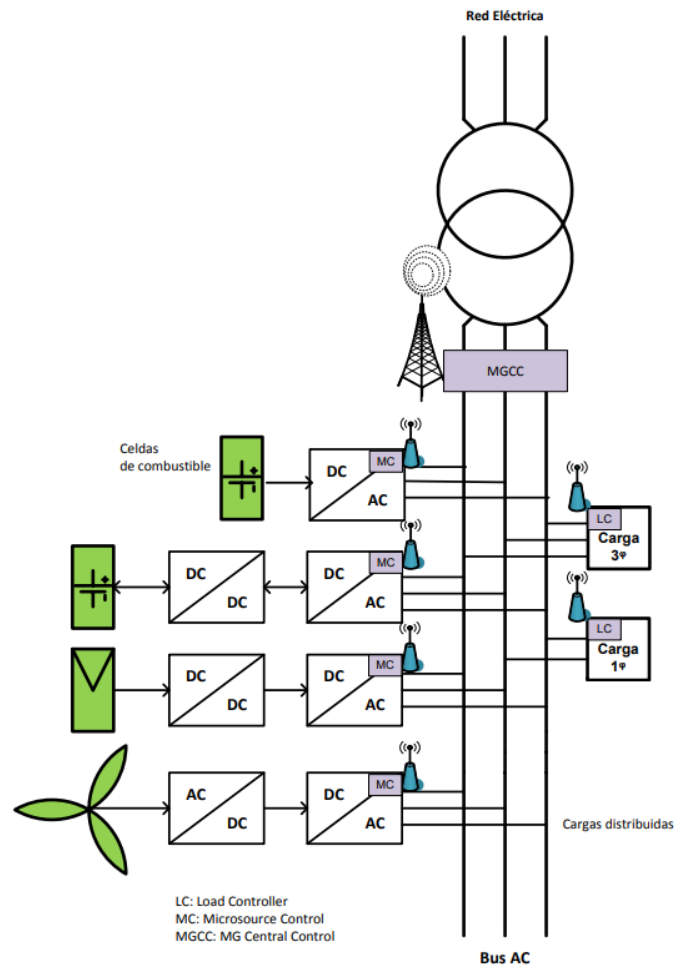


Figura 11 Esquema de la micro red eléctrica de prueba.

3.1.3.2 Período de muestreo de las variables de la micro red eléctrica. Para un sistema de control centralizado como el mostrado en la Figura 11 que cuenta con una central de control maestro, dos recursos energéticos distribuidos, dos almacenadores y dos cargas, el reunir la información que cada nodo toma un tiempo en la transmisión que en esta sección se llama tiempo de sensado pero que en términos de comunicaciones puede entenderse como el retardo punto a punto, también existe un tiempo de cómputo o cálculo de la acción de control que el sistema de control debe procesar basado en una referencia, para los análisis y resultados de este trabajo de grado tomaremos como referencia un tiempo de cómputo de 0.3 milisegundos tal como lo sugiere el artículo de Mahmoud & Rahman (2016). Por último está un tiempo en el que se envía información con las acciones de control a cada uno de los nodos de la red, la suma de estos tiempos determinan el período de muestreo de las variables de la micro red eléctrica interpretado por la variable “ T ” en la Figura 12, esta variable también identifica el instante en el que el sistema de control toma información de los nodos y actualiza la acción de control. Los tiempos de sensado y envío de las acciones de control están directamente relacionados con el retardo punto a punto de la red inalámbrica mientras que el tiempo de cómputo es netamente propio del sistema de control (ver Figura 12).

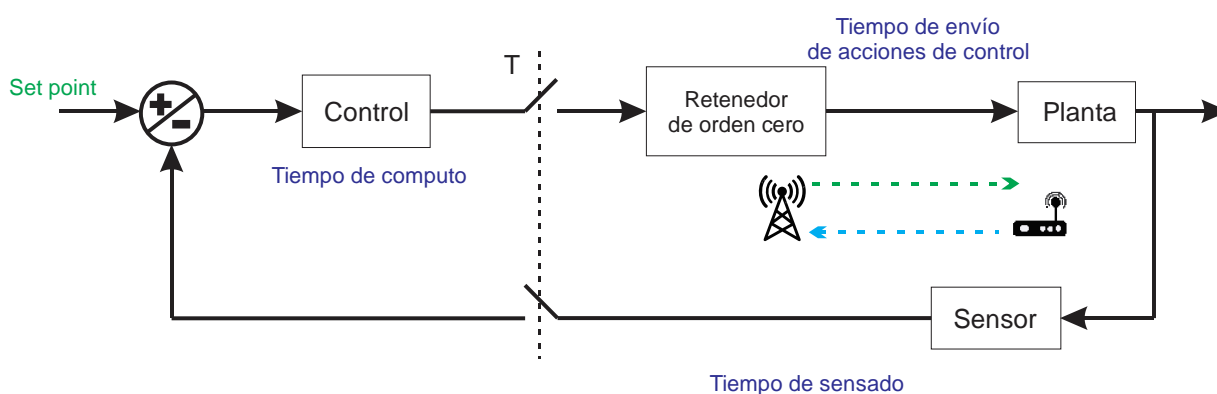


Figura 12 Esquema básico de un lazo cerrado de control

Nuestras pruebas buscan que el tiempo de retardo punto a punto sean lo mejor posible de esta manera se asegura una rápida recolección y envío de información dentro de la micro red eléctrica haciendo que el sistema de control sea más rápido.

3.1.4 Parámetros generales programados en las simulaciones. Dentro de los muchos parámetros que pueden ser programados en el estándar, varios de ellos vienen con un valor por defecto, pero se permite la posibilidad de variarlos dentro de un rango definido, con el fin de realizar una prueba lo más cercana a las condiciones empleadas en una implementación real se recurrió a documentación de simulaciones ya hechas por los desarrolladores de varios entornos de simulación y de estudios de desempeño del estándar en distintas aplicaciones.

Algunos de los parámetros que se pueden programar como el orden de la trama beacon (BO), el canal físico, el tamaño de cola IFQ, el ciclo útil entre otros, son totalmente de libre opción por el programador y todos están relacionados al comportamiento de la red, es por ello por lo que se realizó el estudio del comportamiento del estándar bajo los distintos modos de operación en cada perfil de simulación, para luego destacar el o los más exitosos en una implementación real.

En primera instancia se consideraron 15 perfiles de simulación (ver Tabla 2), pero debido a las limitaciones que presenta el framework a la hora de simular el modo GTS y que la posibilidad del modo sin trama de beacon habilitada proporciona tiempos de retardo aleatorios en la conexión de los nodos al coordinador PAN, se redujeron los perfiles de simulación a solo 6 (ver Tabla 3).

Tabla 2 Perfiles de simulación considerados

| Perfil | Beacon | ACK | GTS | Modo CCA |
|--------|--------|-----|-----|----------|
| 1 | Sí | Sí | Sí | 1 |
| 2 | No | No | No | 1 |
| 3 | Sí | No | Sí | 1 |

| | | | | |
|----|----|----|----|---|
| 4 | Sí | No | No | 1 |
| 5 | No | Sí | No | 1 |
| 6 | Sí | SÍ | SÍ | 2 |
| 7 | No | No | No | 2 |
| 8 | Sí | No | Sí | 2 |
| 9 | Sí | No | No | 2 |
| 10 | No | Sí | No | 2 |
| 11 | Sí | SÍ | SÍ | 3 |
| 12 | No | No | No | 3 |
| 13 | Sí | No | Sí | 3 |
| 14 | Sí | No | No | 3 |
| 15 | No | Sí | No | 3 |

Tabla 3 Perfiles de simulación elegidos

| Perfil | Beacon | ACK | GTS | Modo CCA |
|---------------|---------------|------------|------------|---------------------|
| 1 | Sí | No | No | 1 |
| 2 | Sí | No | No | 2 |
| 3 | Sí | No | No | 3 |
| 4 | Sí | Sí | No | 1 |
| 5 | Sí | Sí | No | 2 |
| 6 | Sí | Sí | No | 3 |

Lo valores elegidos para las variables más importantes en cada una de las simulaciones se presentarán a continuación:

- Duración de la simulación: Este valor es variable y es directamente proporcional a la frecuencia de envío que se está utilizando en la prueba, de modo que si tenemos las frecuencias de envío de 10ms, 100ms y 1s corresponderán respectivamente el tiempo de simulación de 11.5s, 101.5s y 1001.5s, lo que se quiere con este proceso es emular el tiempo estimado que le toma a cada nodo RFD tomar 1000 paquetes de datos, realizarle las conversiones pertinentes, procesarlos y enviarlos al nodo coordinador.

- El flujo de datos propuestos es del tipo CBR (Constant Bit Rate) o velocidad de bits constante en donde pretendemos emular el comportamiento determinístico de lectura de variables de los nodos RFD en un esquema de control centralizado.

- Número de canal: 25 ubicado a la frecuencia de 2475 [MHz].
- Potencia de transmisión de la antena: 1 [mW].
- Sensibilidad de la antena transceptora: -85 [dBm].
- Módulo de batería: El módulo de batería funciona bajo 4 estados, cada uno proporcionara el consumo energético según su función del estado de la radio, para nuestro caso utilizamos el transceptor CC1100 como el indicado en nuestras simulaciones debido a que es el mayormente utilizado en las aplicaciones y simulaciones de los distintos documentos revisados, ver Tabla 4.

Tabla 4 Factores de consumo de la batería de un transceptor CC1100

| Estado | Consumo [mA] |
|-------------|--------------|
| Idle | 1.38 |
| Recepción | 9.6 |
| Reposo | 0.06 |
| Transmisión | 17 |

- Tamaño de paquetes :28 bytes.

- Tiempo de emisión del primer paquete: 1.5 [s].
- Número de paquetes enviados por nodo: 1000.

3.2 Diseño de pruebas y simulaciones

En esta sección nos centraremos en las características de cada escenario y los parámetros bajo los cuales fue diseñado, mencionando los factores del desempeño que fueron puestos a prueba. Esta parte del trabajo está dividida en 3 fases: el primer grupo de pruebas, las pruebas de desempeño del estándar con ciclo útil de 50% y por último el desempeño a un ciclo útil del 100%. En general en todas las fases se identifican los efectos del uso de tramas de reconocimiento ACK, los resultados con diferentes intervalos de envío de paquetes y también los tres modos de operación del protocolo CCA de la capa física. La primera fase corresponde a las pruebas iniciales que se les realizaron a todos los perfiles escogidos con el fin de encontrar configuraciones óptimas para cada uno de ellos, los resultados de esta fase fueron fundamentales para el desarrollo de las otras dos, debido a que con esta se descartaron algunas configuraciones facilitando la búsqueda del mejor desempeño del estándar. Las fases de las pruebas de desempeño del estándar con ciclo útil de 50% del 100% son (estructuralmente hablando) iguales debido a que se realizan las mismas simulaciones, pero con diferentes ciclos útiles.

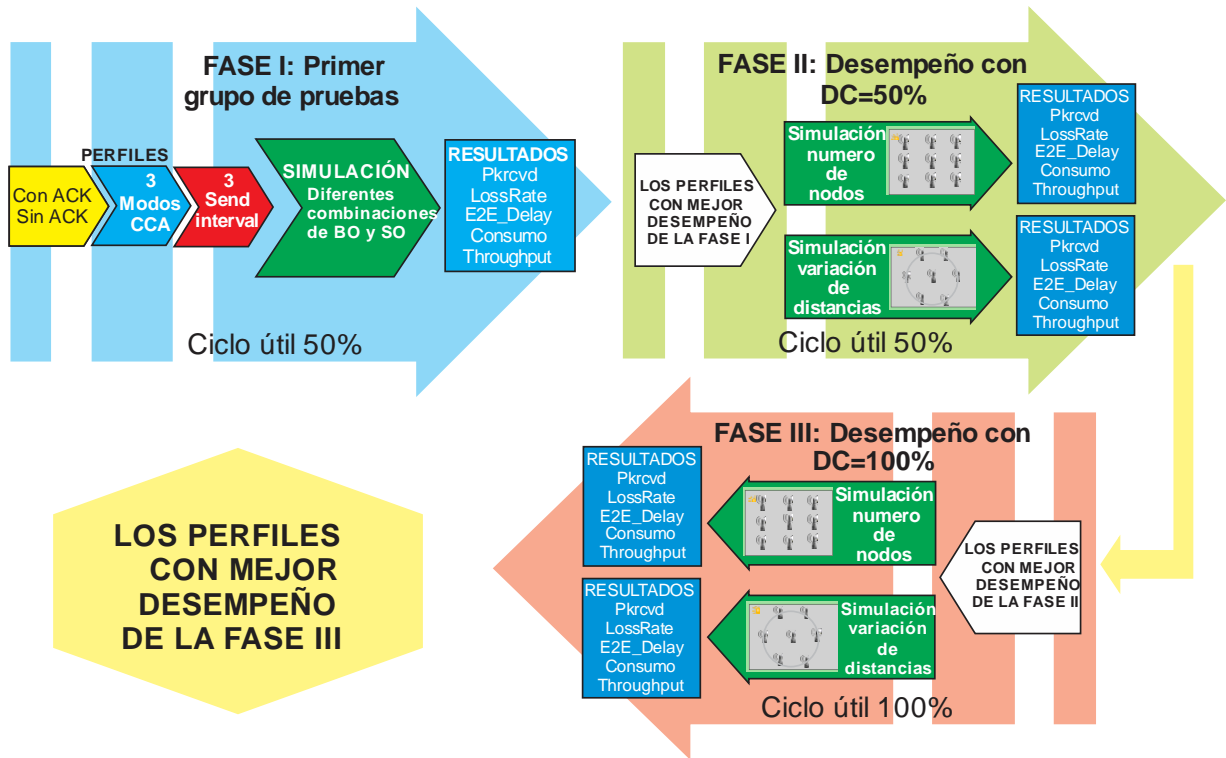


Figura 13 Descripción general de las fases y pruebas planteadas para las simulaciones.

3.2.1 **Fase I: Primer grupo de pruebas.** Como ya se ha mencionado esta fase corresponde a las pruebas iniciales que se le hicieron a cada uno de los perfiles escogidos en la Tabla 3, el objetivo es encontrar configuraciones que optimicen el desempeño del estándar basado en los resultados del throughput, el retraso punto a punto, la cantidad de datos recibidos satisfactoriamente, la tasa de pérdida de datos y el consumo de energía, para ello se diseñó una topología estrella centralizada tal y como puede verse en la Figura 14 en donde todos los nodos RFD se encuentran a 100 metros del coordinador, se definió un ciclo útil de la super trama de 50% lo cual se consigue manteniendo la siguiente relación según las ecuaciones del intervalo de beacons (BI) y la duración de la super trama (SD).

$$Para 0 \leq SO \leq BO \leq 14, \quad SO = BO + 1$$

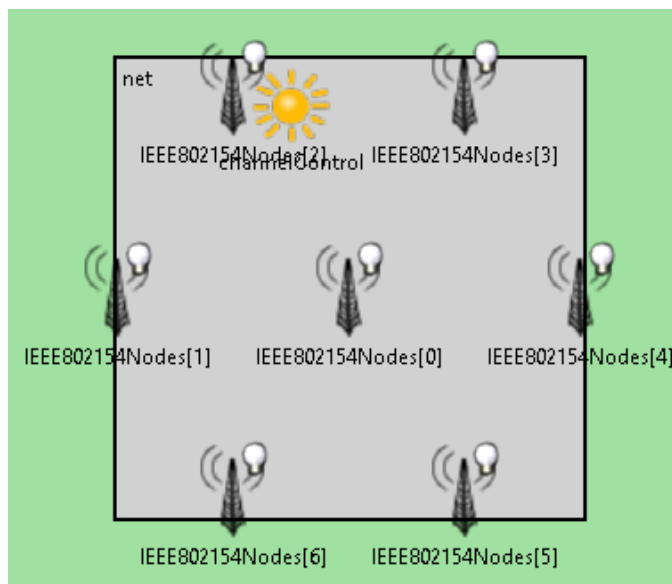


Figura 14 Topología estrella centralizada diseñada para la fase I

Entonces existen 14 opciones posibles para mantener un ciclo útil del 50% ya que los criterios para ello son que el orden de la trama beacon sea menor a 14 y que a su vez este sea mayor por un grado al orden de la supertrama, debido a que el objetivo es encontrar el par de ordenes BO y SO que permitan el mejor desempeño de la red, se realizaron pruebas a los perfiles mostrados en la Tabla 3 con diferentes parejas de SO y BO y además diferentes valores de intervalos de envío (Send_Interval) tal como se muestra en la Tabla 5.

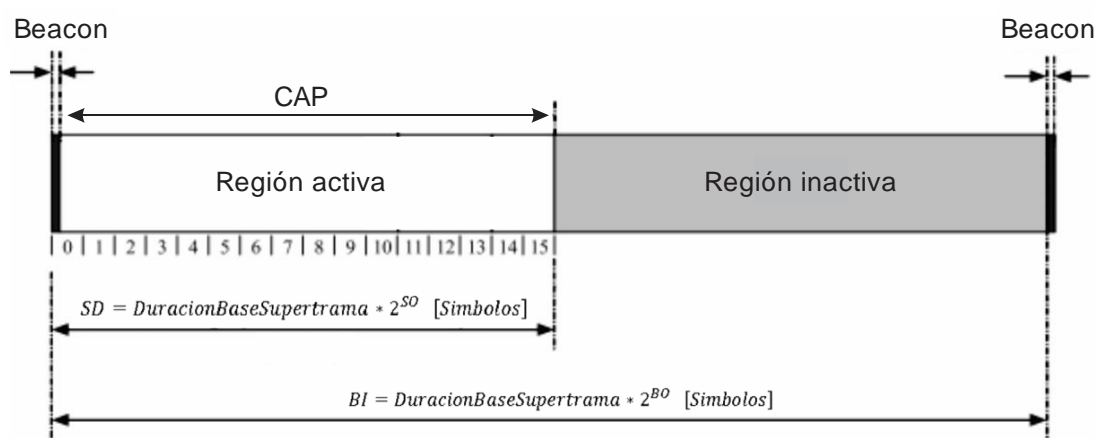


Figura 15 Estructura de la supertrama para las pruebas de la fase I

Tabla 5 Configuraciones de las pruebas realizadas en la fase I

| | BO | SO | Send_Interval |
|-----------------|----|------|---------------|
| | | | [ms] |
| Perfil N | 1 | 0 | 10 |
| | 1 | 0 | 100 |
| | 1 | 0 | 1000 |
| | 3 | 2 | 10 |
| | 3 | 2 | 100 |
| | 3 | 2 | 1000 |
| | 5 | 4 | 10 |
| | 5 | 4 | 100 |
| | 5 | 4 | 1000 |
| | 7 | 6 | 10 |
| | 7 | 6 | 100 |
| | 7 | 6 | 1000 |
| | 9 | 8 | 10 |
| | 9 | 8 | 100 |
| | 9 | 8 | 1000 |
| | 11 | 10 | 10 |
| | 11 | 10 | 100 |
| | 11 | 10 | 1000 |
| 13 | 12 | 10 | |
| 13 | 12 | 100 | |
| 13 | 12 | 1000 | |

Los resultados de esta fase (los cuales se abordarán con detalle en el siguiente capítulo) permitieron identificar configuraciones más adecuadas por lo que las pruebas de las siguientes fases no se realizaron a todos los perfiles.

3.2.2 Fase II: Desempeño de la red con un ciclo útil de 50%. Para los perfiles y configuraciones con mejores resultados en la fase uno se prepararon la serie de pruebas que componen esta fase, en esta se busca evaluar el estándar bajo dos criterios, el primero es el desempeño a medida que aumenta el número de nodos por coordinador y el segundo es el desempeño a medida que se aumenta la distancia entre los nodos y el coordinador.

3.2.2.1 Fase II.1: Desempeño del estándar aumentando el número de nodos.

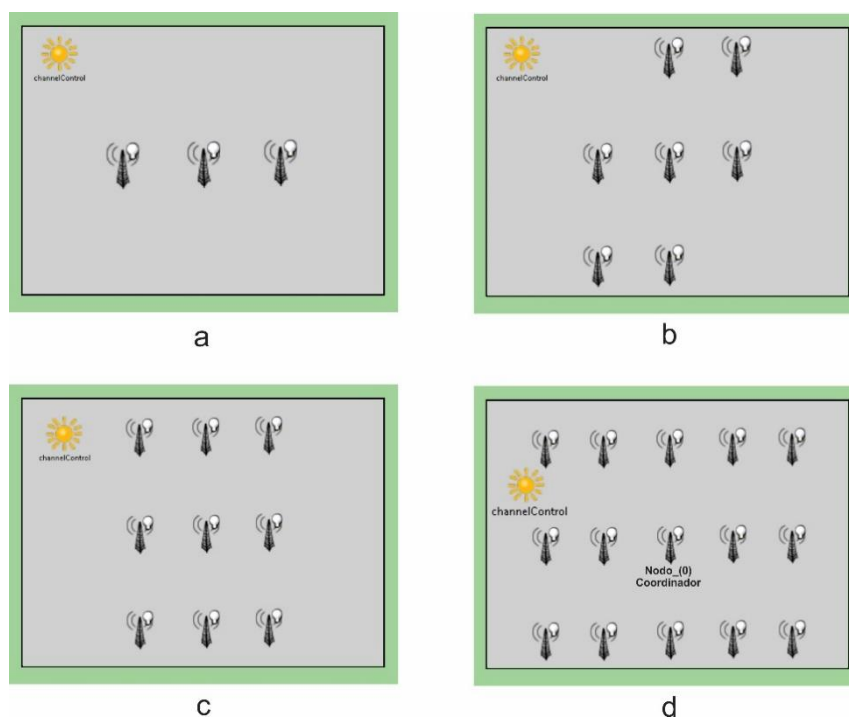


Figura 16 Topología matricial diseñada para la fase II.1

El objetivo de esta fase es evaluar el desempeño del estándar a medida que se aumentan los nodos, la topología usada es estrella, pero los nodos no están a una misma distancia del

coordinador como en las pruebas de la fase uno, sino que se organizan de forma matricial separados 10 metros entre sí tal y como puede verse en la Figura 16, se fue aumentando la cantidad de nodos de dos en dos hasta quince a medida que se simulaban las pruebas y se tomaron los resultados.

3.2.2.2 Fase II.2 Desempeño del estándar aumentando la distancia entre los nodos y el coordinador. El objetivo de esta fase es poner a prueba la cobertura que puede tener la red bajo el estándar IEEE 802.15.4, para ello se retomó una topología estrella centralizada de 6 nodos RFD y un coordinador, se fue aumentando la distancia entre los nodos y el coordinador de 10 en 10 hasta 100 metros a medida que se simulaban y se tomaban los resultados.

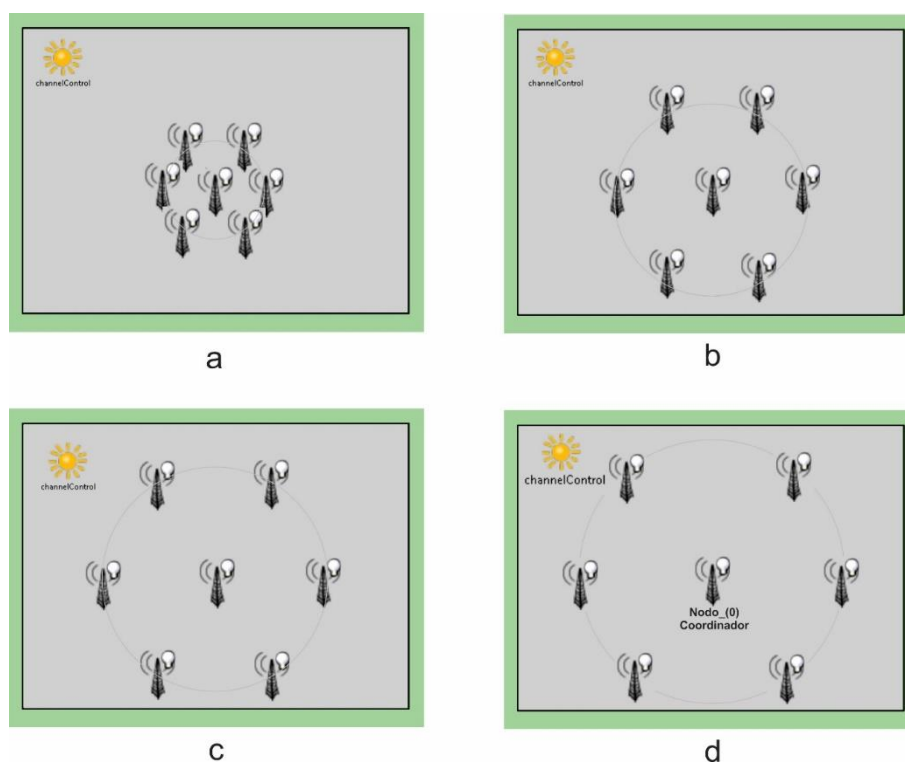


Figura 17 Topología diseñada para las pruebas de la fase II.2

3.2.3 Fase III: Desempeño de la red con un ciclo útil del 100%. El objetivo de esta fase es mejorar los buenos resultados que algunos perfiles y configuraciones han tenido hasta ahora, de manera que en estas pruebas dejamos de lado el ahorro de energía que se consiguió al tener un ciclo útil de 50 %, entonces se vuelven a hacer las pruebas y simulaciones de la fase dos, pero asignándole a la supertrama un ciclo útil de 100% por lo que ya no se tendrá una región inactiva y las ranuras de tiempo serán el doble que en las fases anteriores. Dado a que se quiere que la región activa ocupe todo el intervalo de beacon es necesario asignar un orden para la trama de beacon igual al orden de la super trama de esta manera la duración del intervalo de beacons será igual a la duración de la super trama, ver Figura 18.

$$Si BI = SD$$

$$\rightarrow BO = SO$$

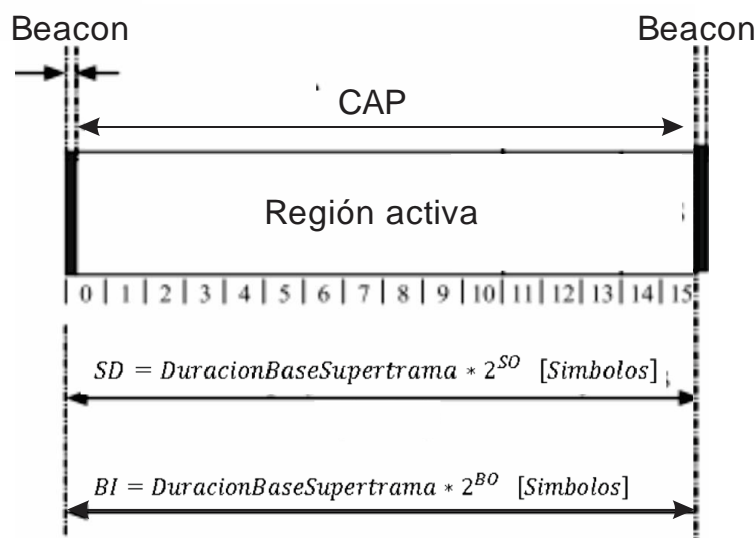


Figura 18 Estructura de la supertrama para las pruebas de la fase III

4 Análisis de resultados

4.1 Fase I: Primer grupo de pruebas.

Siguiendo el planteamiento descrito del capítulo anterior, esta fase corresponde a las pruebas iniciales que se le hicieron a cada uno de los perfiles escogidos en la Tabla 3, se buscaron los

perfiles de simulación con mejor desempeño identificando las mejores combinaciones de los parámetros BO y SO, es necesario aclarar que estos perfiles elegidos no son universales y no mostrarían el mismo desempeño en cualquier implementación pero dan una orientación sobre el modo en que se haría una elección de parámetros para futuros diseños de una micro red eléctrica con una red de comunicaciones inalámbricas basado en este estándar. Los resultados de esta fase fueron un primer paso en la búsqueda de los parámetros adecuados para una configuración del estándar con un buen desempeño, a continuación, veremos las gráficas y tablas de los resultados conseguidos en este primer grupo de pruebas.

4.1.1 Variación de los parámetros BO y SO

4.1.1.1 Simulación Perfil 1.

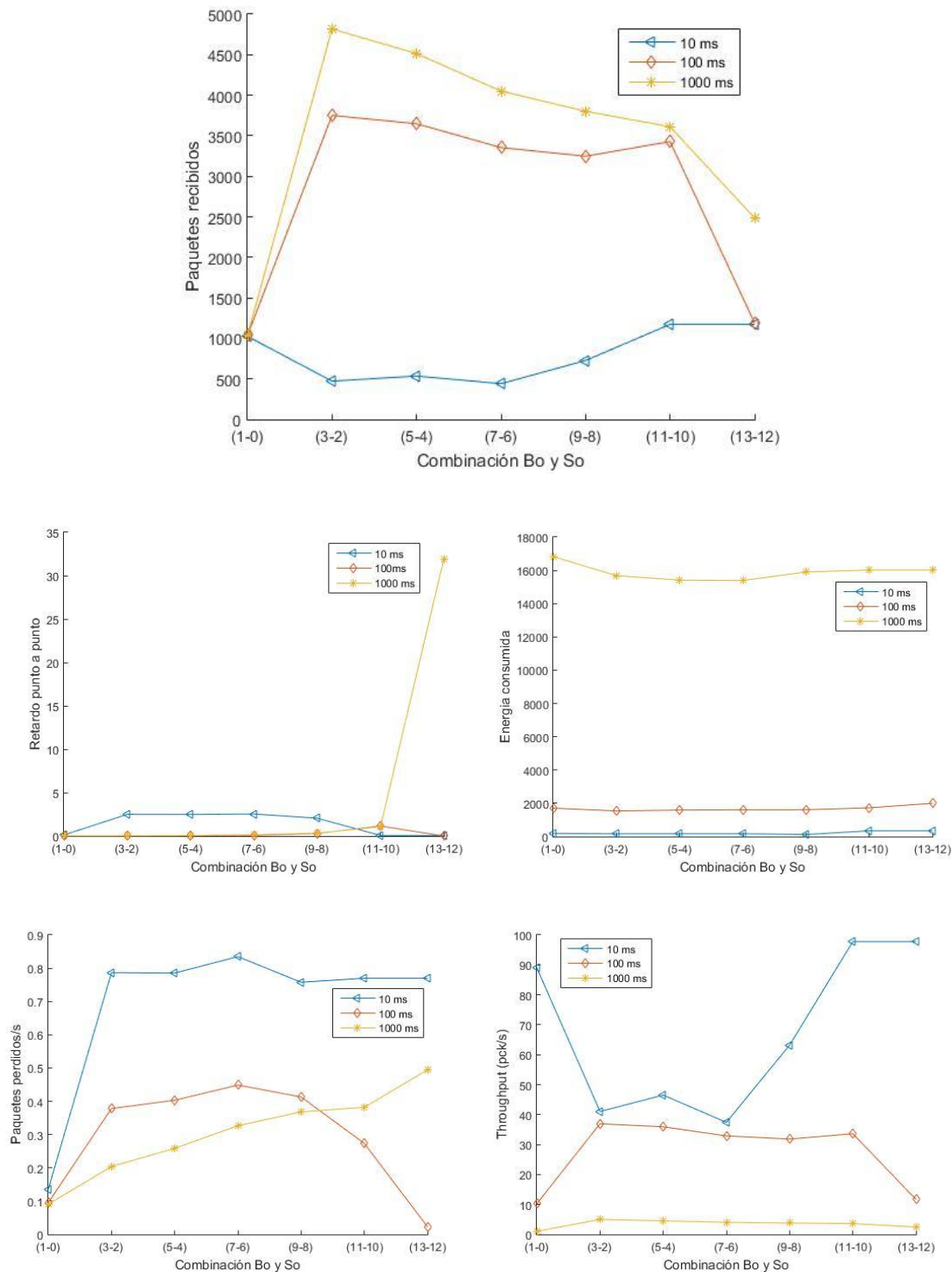


Figura 19 Resultados del perfil 1 fase I.

4.1.1.2 Simulación Perfil 2.

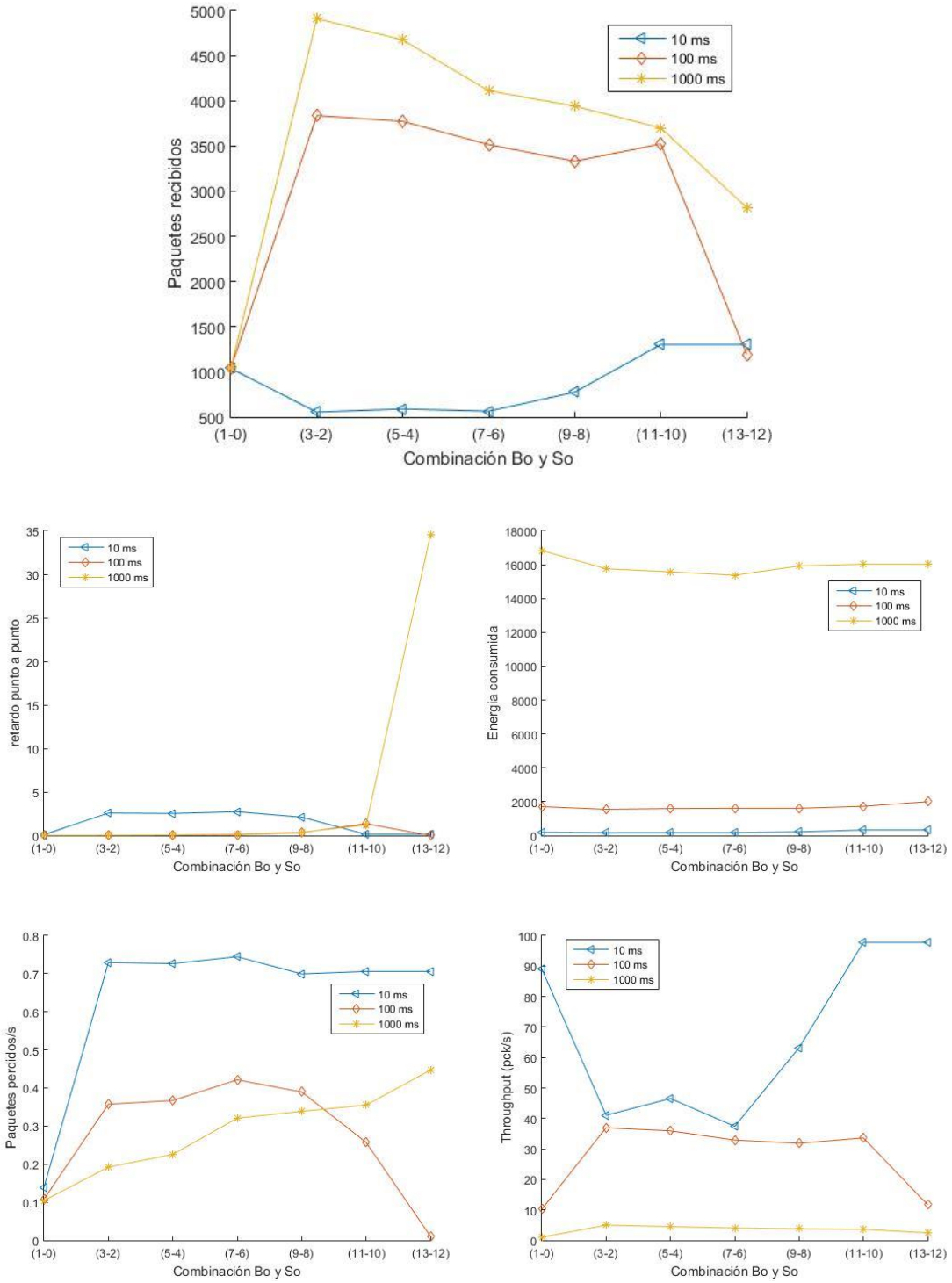


Figura 20 Resultados del perfil 2 fase I.

4.1.1.3 Simulación Perfil 4.

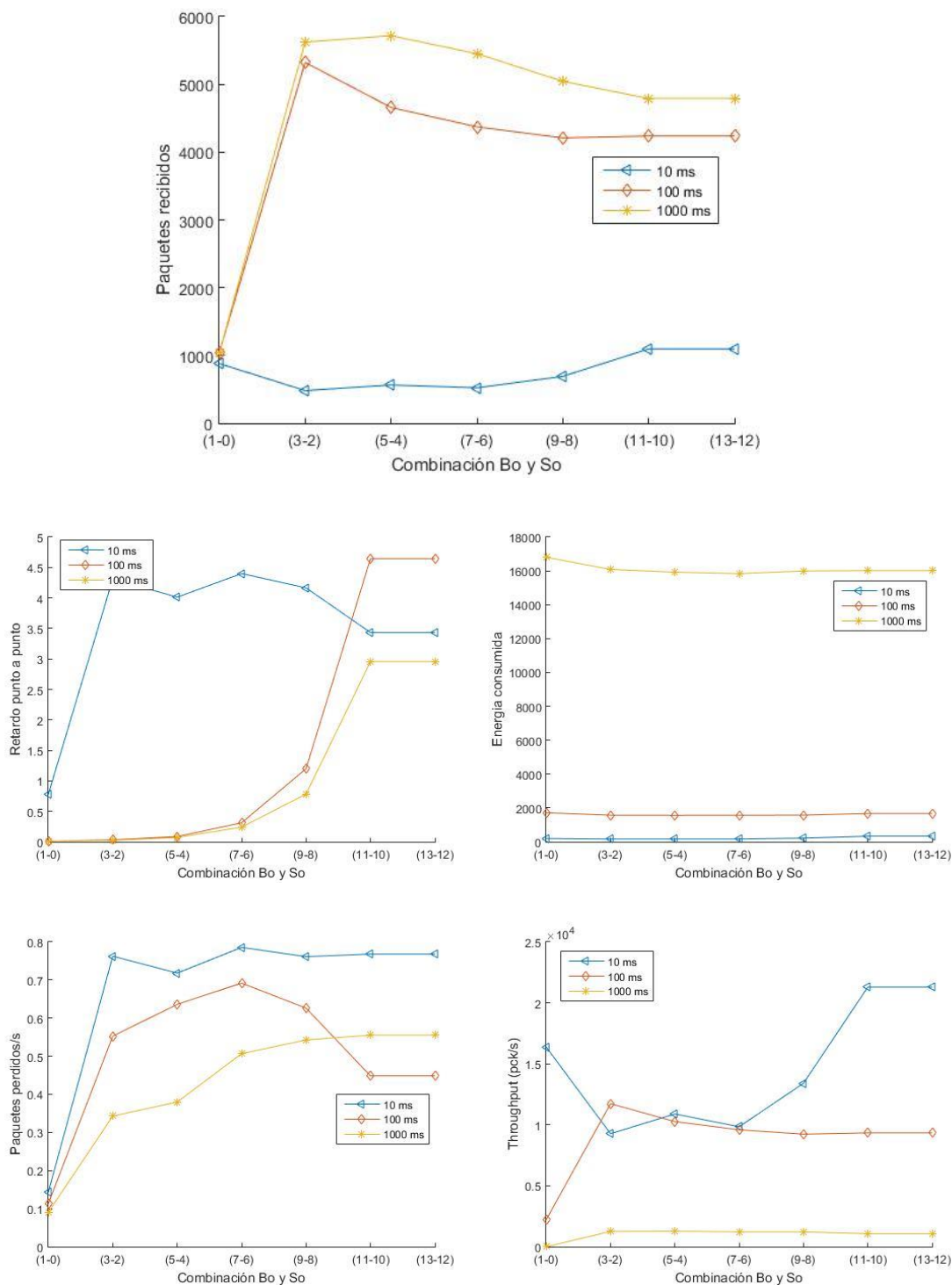


Figura 21 Resultados del perfil 4 fase I.

4.1.1.4 Simulación Perfil 5.

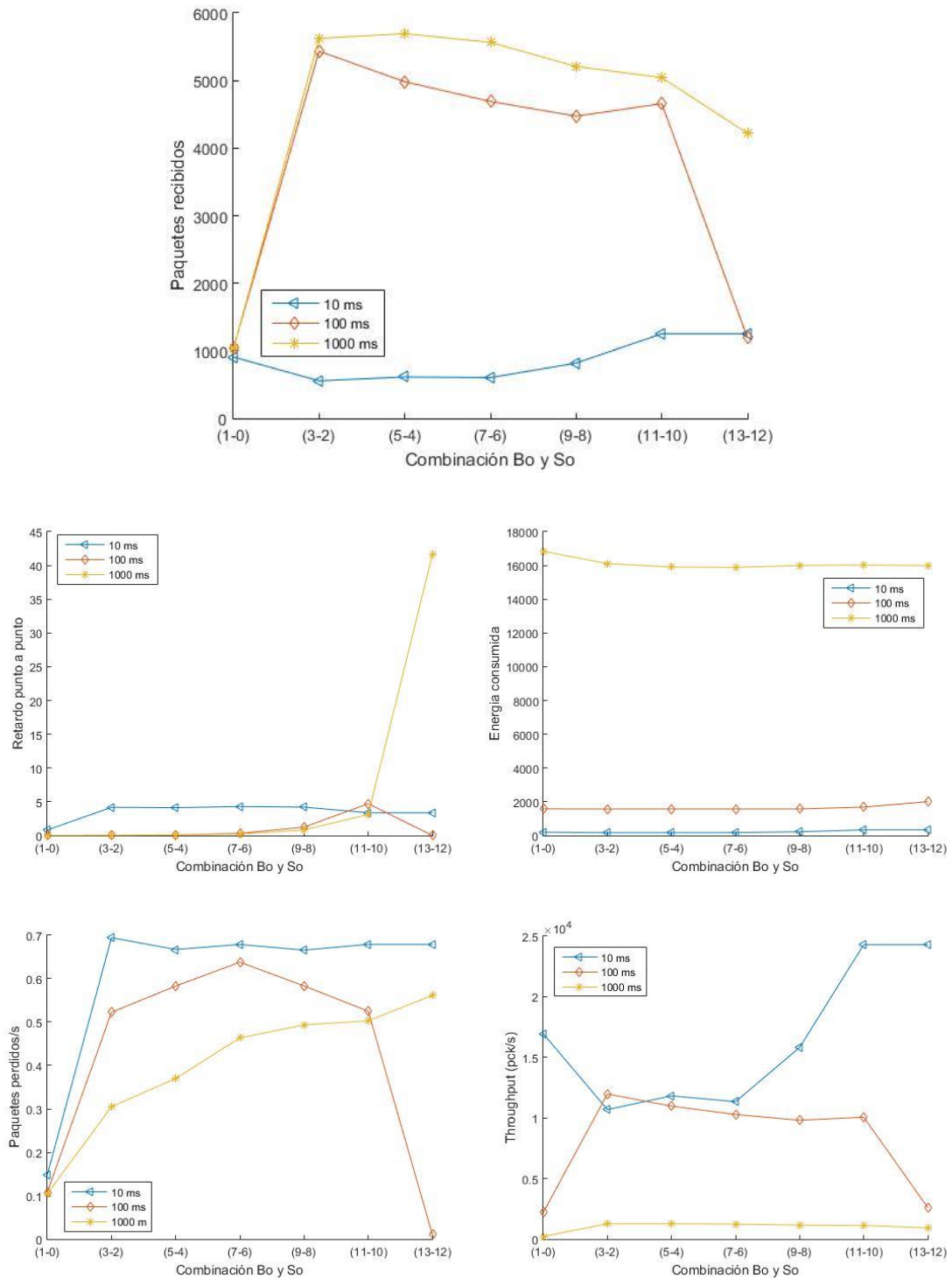


Figura 22 Resultados del perfil 4 fase I

Tabla 6 Resultados de las pruebas del perfil 1, fase 1.

| | BO-SO | rcvdPk | E2E | Consumo | LossRate | Throughpu | Throughpu |
|---------|---------|--------|-----------|---------|----------|------------|------------|
| | | | Delay [s] | [mW] | [pcks/s] | t [pcks/s] | t [bits/s] |
| 10 [ms] | (1-0) | 1024 | 0.1236930 | 194 | 0.135495 | 89.0400 | 19,185.3 |
| | (3-2) | 472 | 2.4950310 | 167 | 0.786720 | 41.0420 | 9,076.5 |
| | (5-4) | 535 | 2.4806107 | 169 | 0.785354 | 46.5213 | 10,303.9 |
| | (7-6) | 441 | 2.5351828 | 171 | 0.834777 | 37.4089 | 8,284.6 |
| | (9-8) | 727 | 2.0503300 | 125 | 0.757691 | 63.2172 | 14,082.7 |
| | (11-10) | 1173 | 0.0677995 | 345 | 0.769887 | 97.7500 | 21,821.3 |
| | (13-12) | 1173 | 0.0677995 | 345 | 0.769887 | 97.7500 | 21,821.3 |

Nota: en estos resultados el perfil fue configurado sin trama de reconocimiento habilitada y puede verse que los mejores resultados se obtuvieron con un BO=11 y SO=10

Tabla 7 Resultados de las pruebas del perfil 2, fase 1.

| | BO-SO | rcvdPk | E2E | Consumo | LossRate | Throughpu | Throughpu |
|----------|---------|--------|-----------|---------|----------|------------|------------|
| | | | Delay [s] | [mW] | [pcks/s] | t [pcks/s] | t [bits/s] |
| 100 [ms] | (1-0) | 1038 | 0.011702 | 1706.86 | 0.10796 | 10.2260 | 2,206.8 |
| | (3-2) | 3836 | 0.018368 | 1549.09 | 0.35742 | 37.7837 | 8,450.3 |
| | (5-4) | 3772 | 0.037021 | 1592.30 | 0.36705 | 37.1485 | 8,308.0 |
| | (7-6) | 3515 | 0.101142 | 1607.91 | 0.42137 | 34.4608 | 7,706.0 |
| | (9-8) | 3330 | 0.339992 | 1609.44 | 0.38951 | 32.6471 | 7,299.8 |
| | (11-10) | 3522 | 1.352950 | 1726.96 | 0.25712 | 34.5294 | 7,721.4 |
| | (13-12) | 1192 | 0.004396 | 2001.04 | 0.01024 | 32.6471 | 2,604.6 |

Nota: en estos resultados el perfil fue configurado sin trama de reconocimiento habilitada y puede verse que los mejores resultados se obtuvieron con un BO=3 y SO=2.

Tabla 8 Resultados de las pruebas del perfil 2 con un intervalo de envío de 1000 ms, fase

1.

| BO-SO | rcvdPk | E2E | Consumo | LossRate | Throughpu | Throughpu |
|---------|--------|-----------|---------|----------|------------|------------|
| | | Delay [s] | [mW] | [pcks/s] | t [pcks/s] | t [bits/s] |
| (1-0) | 1038 | 0.01171 | 16830.1 | 0.104528 | 1.03644 | 223.7 |
| (3-2) | 4909 | 0.02080 | 15754.0 | 0.192290 | 4.90140 | 1,096.6 |
| (5-4) | 4673 | 0.05381 | 15573.6 | 0.225551 | 4.66550 | 1,043.7 |
| (7-6) | 4110 | 0.14568 | 15372.5 | 0.320822 | 4.10255 | 917.6 |
| (9-8) | 3941 | 0.38241 | 15922.7 | 0.338721 | 3.93313 | 879.7 |
| (11-10) | 3700 | 1.21429 | 16026.7 | 0.355049 | 3.69261 | 825.8 |
| (13-12) | 2817 | 34.56460 | 16020.9 | 0.447124 | 2.81138 | 628.4 |

Nota: en estos resultados el perfil fue configurado sin trama de reconocimiento habilitada y puede verse que los mejores resultados se obtuvieron con un BO=3 y SO=2

Tabla 9 Resultados de las pruebas del perfil 4, fase 1.

| BO-SO | rcvdPk | E2E Delay | Consumo | LossRate | Throughpu | Throughpu |
|-------|--------|-----------|---------|-----------|------------|------------|
| | | [s] | [mW] | [pcks/s] | t [bits/s] | t [pcks/s] |
| (1-0) | 880 | 0.7774082 | 200.85 | 0.1430595 | 16380.792 | 76.52 |
| (3-2) | 482 | 4.3149799 | 168.69 | 0.7624709 | 9271.6003 | 41.91 |

| | | | | | | |
|---------|------|----------------|--------|----------------|----------------|-------|
| (5-4) | 565 | 4.0121562 7 | 170.61 | 0.7181209 4 | 10888.196 | 49.13 |
| (7-6) | 523 | 4.4005990 6 | 173.00 | 0.7855632 3 | 9842.7091 3 | 44.36 |
| (9-8) | 692 | 4.1645148 4 | 220.79 | 0.7612521 8 | 13401.005 8 | 60.17 |
| (11-10) | 1097 | 3.4327771 3 | 332.23 | 0.7680391 4 | 21288.909 2 | 95.39 |
| (13-12) | 1097 | 3.4327771 3 | 332.23 | 0.7680391 4 | 21288.909 2 | 95.39 |

Nota: en estos resultados el perfil fue configurado con trama de reconocimiento habilitada y puede verse que los mejores resultados se obtuvieron con un BO=1 y SO=0.

Tabla 10 Resultados de las pruebas del perfil 5, fase 1.

| BO-SO | rcvdPk | E2E Delay | Consumo | LossRate | Throughput | Throughput |
|-------|--------|----------------|-----------|----------------|-----------------|------------|
| | | [s] | [mW] | [pcks/s] | [bits/s] | t [pcks/s] |
| (1-0) | 1038 | 0.0121776 1 | 1,580.775 | 0.1079596 4 | 2206.76610 | 10.23 |
| (3-2) | 5434 | 0.0336855 2 | 1,570.908 | 0.5226304 3 | 11976.0384 3 | 53.52 |
| (5-4) | 4982 | 0.0903220 3 | 1,573.568 | 0.5830052 3 | 10977.3607 7 | 49.07 |
| (7-6) | 4691 | 0.3232707 9 | 1,573.649 | 0.6381018 3 | 10288.6274 5 | 45.99 |

100 [ms]

| | | | | | | |
|---------|------|----------------|-----------|----------------|-----------------|-------|
| (9-8) | 4473 | 1.2475698 6 | 1,574.665 | 0.5832931 2 | 9809.88235 | 43.85 |
| (11-10) | 4658 | 4.7172207 2 | 1,683.956 | 0.5250384 1 | 10067.8525 2 | 45.00 |
| (13-12) | 1192 | 0.0048135 8 | 2,010.223 | 0.0102421 6 | 2604.54902 | 11.69 |

Nota: en estos resultados el perfil fue configurado con trama de reconocimiento habilitada y puede verse que los mejores resultados se obtuvieron con un BO=3 y SO=2.

Tabla 11 Resultados de las pruebas del perfil 5 con un intervalo de envío de 1000 ms, fase 1.

| | BO-SO | rcvdPk | E2E Delay | Consumo | LossRate | Throughpu | Throughpu |
|-----------|-------|--------|----------------|----------|-----------|------------|------------|
| | | | [s] | [mW] | [pcks/s] | t [bits/s] | t [pcks/s] |
| 1000 [ms] | (1-0) | 1038 | 0.0121468 4 | 16,837.8 | 0.1045284 | 223.664 | 1.036 |
| | (3-2) | 5623 | 0.0251992 4 | 16,109.1 | 0.3050519 | 1,271.021 | 5.680 |
| | (5-4) | 5695 | 0.0711343 2 | 15,906.0 | 0.3700165 | 1,272.290 | 5.686 |
| | (7-6) | 5565 | 0.2463661 3 | 15,885.1 | 0.4636261 | 1,242.959 | 5.555 |
| | (9-8) | 5209 | 0.8177936 4 | 15,999.6 | 0.4935272 | 1,163.146 | 5.199 |

| | | | | | | |
|---------|------|----------------|----------|-----------|-----------|-------|
| (11-10) | 5044 | 3.1321043 1 | 16,024.8 | 0.5029860 | 1,126.259 | 5.034 |
| (13-12) | 4218 | 41.631581 4 | 15,993.6 | 0.5615931 | 941.605 | 4.210 |

Nota: en estos resultados el perfil fue configurado con trama de reconocimiento habilitada y puede verse que los mejores resultados se obtuvieron con un BO=3 y SO=2.

Antes de continuar con los análisis de los resultados mostrados en las gráficas y tablas anteriores, es necesario mencionar que los resultados de los perfiles 3 y 6 no fueron mostrados ya que fueron exactamente iguales a los de los perfiles 2 y 5 respectivamente, esto es debido a que el tercer modo de operación CCA de la capa física es un híbrido entre los modos de detección de energía (ED) y el modo de sensado de portadora (CS), pero este opera como una combinación lógica de los dos, priorizando el sensado de portadora, es por eso que los resultados son iguales a los conseguidos con los perfiles con el modo CCA dos (CS) (IEEE/ComputerSociety, 2006), por ello tampoco serán incluidos estos resultados en las pruebas de las siguientes fases, lo que deja los cuatro perfiles de simulación de la Tabla 12

Tabla 12 Perfiles de simulación resultantes después de las pruebas de la fase I.

| Perfil | Beacon | ACK | GTS | Modo CCA |
|--------|--------|-----|-----|-------------|
| 1 | Sí | No | No | 1 |
| 2 | Sí | No | No | 2 |
| 4 | Sí | Sí | No | 1 |
| 5 | Sí | Sí | No | 2 |

En la búsqueda de los mejores valores de BO y SO, las pruebas de esta fase permitieron conocer que valores altos de BO y SO tales como 13 y 12 o 10 y 9 causan grandes dificultades

para la red en todos los casos sin excepción, se nota un mal desempeño proporcional al orden de la trama de beacon y la supertrama incurriendo en una tasa poco exitosa de paquetes recibidos, un throughput que se mantuvo estable en la mayoría de las variaciones pero que disminuyó notablemente en las más altas, además de una tasa de paquetes perdidos por unidad de tiempo con tendencias a aumentar a medida que lo hacen los valores de BO y SO.

Aunque existe una relación directa entre el valor del orden de la supertrama y un bajo desempeño, la pareja de valores BO=1 y SO=0 resultó con tan solo un 12% de paquetes entregados exitosamente, siendo esta la excepción ya que con combinaciones como BO=3 SO=2 los resultados fueron mucho mejores, sin embargo para pequeñas combinaciones de BO y SO sin importar el tráfico generado y el tamaño de las cargas el retardo punto a punto es pequeño, la razón de esto es que todas las componentes de la red en tiempos de transmisiones pequeños son relativamente ligeras, debido a esto la gran mayoría de los paquetes que son generados por los nodos RFD llegan exitosamente al nodo coordinador.

Al emplear las tramas de reconocimiento ACK en algunos perfiles de simulación con el fin de tener una comunicación exitosa, aumenta el tiempo de retardo punto a punto promedio por cada paquete, esto es debido al tiempo adicional que le toma a la red retransmitir los paquetes que se pierden, esta situación hace que las redes que no utilizan reconocimiento ACK sean más rápidas con retardos mucho más cortos, finalmente esto ocurre debido a que los paquetes que presenten mayor retardo son descartados por completo del flujo de datos mejorando la latencia, pero a costo de perder algunos de los paquetes transmitidos. Los paquetes que son retransmitidos presentan grandes retardos porque no solo deben reenviarse y viajar por la red el doble del tiempo en el peor de los casos, sino que también deben esperar a que el remitente detecte de la pérdida del paquete hasta que se le envié un ACK o por el contrario no se reciba el ACK de confirmación en un tiempo determinado.

Los resultados revelan una tendencia en donde a pesar de mantener el ciclo útil y el flujo de datos de la red constantes esta necesita consumir más energía para enviar una carga útil, incluso en muchos casos desmejorando su desempeño, esto es debido a que el aumento de la pérdida de paquetes es proporcional al aumento del orden de BO y SO, si promediamos la cantidad de paquetes exitosos recibidos de la simulación con la cantidad de energía consumida por paquete exitoso, el consumo energético tiende a elevarse junto con la variación.

Dos de los grandes rasgos que se pudieron notar en los perfiles simulados, es la gran tendencia que tienen los perfiles sin tramas de reconocimiento (ACK) de brindar retardos punto a punto más pequeños, mientras que los perfiles que si los usan permiten gran confiabilidad en los datos transmitidos a costa de retardos punto a punto más grandes, en base a estas dos tendencias se lograron ubicar dos grandes grupos de perfiles con 3 diferentes modos de operación de la capa física, por otro lado, el estándar hace uso de distintos modos de operación del protocolo CCA cada uno con parámetros de operación diferentes basándose en la detección de energía (ED), sensado de portadora (CS) y la unión de las dos anteriores, las pruebas permitieron conocer cuál de ellos se desempeñó de la mejor manera, determinando así los mejores perfiles de simulación con reconocimiento ACK y sin ACK para cada intervalo de envío de la frecuencia de muestreo de los nodos sensores o dispositivos finales RFD.

Aplicando la figura de mérito planteada en la sección 3.1.1 de este documento y teniendo en cuenta una equidad en las condiciones correspondientes a la aplicación, los perfiles 1, 2, 4 y 5 consiguieron una ponderación de su desempeño tal y como puede verse en la Tabla 13, las celdas sombreadas corresponden a los perfiles y la respectiva configuración que tuvieron un mejor desempeño durante las pruebas de esta fase y a los que se les realizaron las pruebas de las fases siguientes:

Tabla 13 Ponderación de los perfiles puestos a prueba en la fase I.

| Perfil | ACK | Modo CCA | BO | SO | PONDERACIÓN |
|----------|-----|-------------|----|----|-------------|
| Perfil 1 | No | 1 | 1 | 0 | 58.6 |
| | | | 3 | 2 | 68.8 |
| | | | 5 | 4 | 58.1 |
| | | | 7 | 6 | 49.4 |
| | | | 9 | 8 | 45.8 |
| | | | 11 | 10 | 45.3 |
| | | | 13 | 12 | 59.5 |
| Perfil 2 | No | 2 | 1 | 0 | 57.7 |
| | | | 3 | 2 | 68.7 |
| | | | 5 | 4 | 58.3 |
| | | | 7 | 6 | 50.1 |
| | | | 9 | 8 | 46.3 |
| | | | 11 | 10 | 46 |
| | | | 13 | 12 | 59.5 |
| Perfil 4 | SÍ | 1 | 1 | 0 | 56.5 |
| | | | 3 | 2 | 71 |
| | | | 5 | 4 | 59.8 |
| | | | 7 | 6 | 54.6 |
| | | | 9 | 8 | 52.5 |
| | | | 11 | 10 | 51.6 |

| | | | | | |
|----------|----|---|----|----|------|
| Perfil 5 | SÍ | 2 | 13 | 12 | 51.6 |
| | | | 1 | 0 | 58 |
| | | | 3 | 2 | 72 |
| | | | 5 | 4 | 62 |
| | | | 7 | 6 | 57 |
| | | | 9 | 8 | 54.5 |
| | | | 11 | 10 | 54.4 |
| | | | 13 | 12 | 59.5 |

Tabla 14 Perfiles y configuraciones con los que se consiguió un mejor desempeño en la fase I.

| PERFIL | ACK | Modo CCA | BO | SO | SendInterval [ms] |
|--------|-----|-------------|----|----|----------------------|
| 1 | No | 1 | 11 | 10 | 10 |
| 2 | No | 2 | 3 | 2 | 100 1000 |
| 4 | Sí | 1 | 1 | 0 | 10 |
| 5 | Sí | 2 | 3 | 2 | 100 1000 |

4.2 Fase II: Desempeño de la red con un ciclo útil de 50%

4.2.1 Fase II.1: Desempeño del estándar aumentando el número de nodos.

Siguiendo con la caracterización del estándar, un aspecto de la red que se debe abordar es la cantidad de nodos, en la actualidad no se ha definido un número específico de nodos que deba tener una micro red que haga uso de comunicaciones inalámbricas, la cantidad depende tanto de las limitaciones que presenta la red como de la cantidad de dispositivos necesarios, sin importar la predilección que puede requerir cada caso, existe la necesidad en común de determinar los límites máximos y mínimos de nodos que la red puede soportar por coordinador de acuerdo a ciertas condiciones. Es importante aclarar que para esta fase no se varió el ciclo útil ni las combinaciones posibles de BO y SO, se fijó el interés en el comportamiento de las características de desempeño de acuerdo a los 3 intervalos de envío definidos desde la primera fase, así como también de estudiar la tendencia del comportamiento de la red al ampliar la cantidad de nodos contenidos en la red, la configuración de los perfiles puestos a prueba en esta fase son tal cual como puede verse en la Tabla 14.

4.2.1.1 Simulaciones Perfiles sin ACK

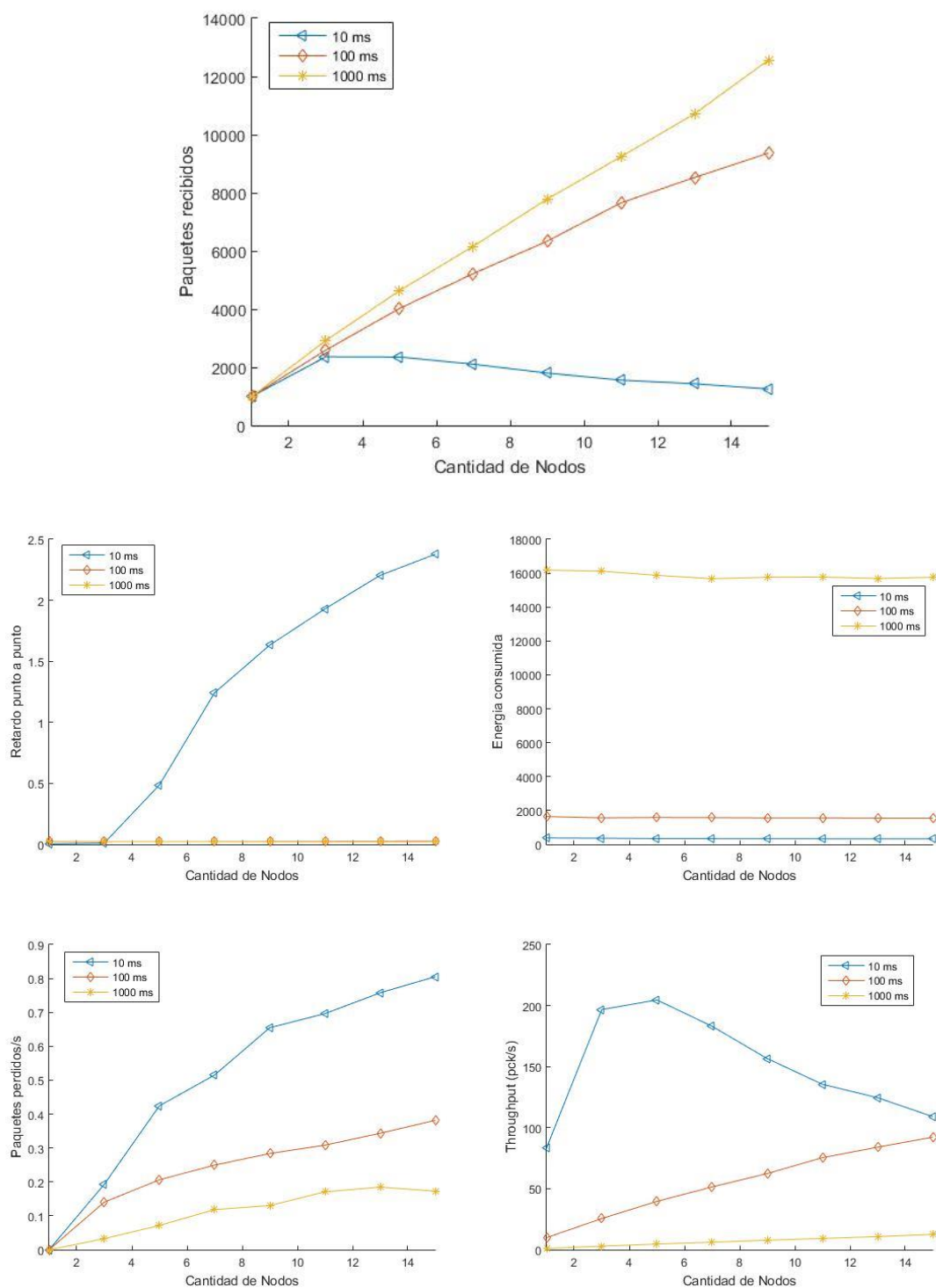


Figura 23 Resultados de los perfiles 1 y 2 en las pruebas de la fase II.1

Tabla 15 Resultados de las pruebas al perfil 1 de la fase II.1

| | #Nodos | rcvdPk | e2eDelay [s] | Consumo [mW] | LossRate [pcks/s] | Throughput [pck/s] |
|--|---------|--------|--------------|-----------------|----------------------|-----------------------|
| | 10 [ms] | 1 | 1001 | 0.0044 | 380.2194 | 0.00000 |
| | 3 | 2361 | 0.0112 | 363.8009 | 0.19318 | 196.75 |
| | 5 | 2353 | 0.4878 | 341.1319 | 0.42452 | 204.61 |
| | 7 | 2105 | 1.2429 | 338.1979 | 0.51535 | 183.04 |
| | 9 | 1801 | 1.6336 | 333.0592 | 0.65488 | 156.61 |
| | 11 | 1558 | 1.9297 | 331.0153 | 0.69628 | 135.47 |
| | 13 | 1432 | 2.2045 | 328.1362 | 0.75764 | 124.52 |
| | 15 | 1254 | 2.3776 | 327.4005 | 0.80553 | 109.04 |

Nota: Para esta prueba el perfil fue configurado con un BO=11, un SO=10, sin tramas de reconocimiento ACK, y con intervalo de envío de 10 ms.

Tabla 16 Resultados de las pruebas al perfil 2 de la fase II.1

| | #Nodos | rcvdPk | e2eDelay [s] | Consumo [mW] | LossRate [pcks/s] | Throughput [pck/s] |
|--|----------|--------|--------------|-----------------|----------------------|-----------------------|
| | 100 [ms] | 1 | 1001 | 0.02328 | 1640.435 | 0.00000 |
| | 3 | 2591 | 0.02230 | 1564.975 | 0.14050 | 25.521 |
| | 5 | 4024 | 0.02251 | 1586.882 | 0.20633 | 39.635 |
| | 7 | 5223 | 0.02333 | 1576.833 | 0.24952 | 51.445 |
| | 9 | 6335 | 0.02410 | 1559.697 | 0.28372 | 62.398 |

| | | | | | |
|----|------|---------|----------|---------|--------|
| 11 | 7653 | 0.02489 | 1561.721 | 0.30840 | 75.380 |
| 13 | 8529 | 0.02574 | 1551.052 | 0.34344 | 84.009 |
| 15 | 9363 | 0.02650 | 1547.081 | 0.38167 | 92.223 |

Nota: Para esta prueba el perfil fue configurado con un BO=3, un SO=2, sin tramas de reconocimiento ACK, y con intervalo de envío de 100 ms.

Tabla 17 Resultados de las pruebas al perfil 2 con un intervalo de envía de 1 [s], fase II.1

| | #Nodos | rcvdPk | e2eDelay [s] | Consumo | LossRate | Throughput |
|-----------|--------|--------|--------------|----------|----------|------------|
| | | | | [mW] | [pcks/s] | [pck/s] |
| 1000 [ms] | 1 | 1001 | 0.02355 | 16181.40 | 0.00000 | 0.999 |
| | 3 | 2919 | 0.02322 | 16116.94 | 0.03259 | 2.914 |
| | 5 | 4635 | 0.02241 | 15873.32 | 0.07159 | 4.628 |
| | 7 | 6162 | 0.02282 | 15674.14 | 0.11833 | 6.152 |
| | 9 | 7782 | 0.02303 | 15758.90 | 0.13023 | 7.770 |
| | 11 | 9236 | 0.02291 | 15771.06 | 0.17072 | 9.222 |
| | 13 | 10719 | 0.02270 | 15687.62 | 0.18473 | 10.702 |
| | 15 | 12562 | 0.02300 | 15756.82 | 0.17256 | 12.543 |

Nota: Para esta prueba el perfil fue configurado con un BO=3, un SO=2, sin tramas de reconocimiento ACK, y con intervalo de envío de 100 [ms].

4.2.1.2 Simulación Perfiles con ACK

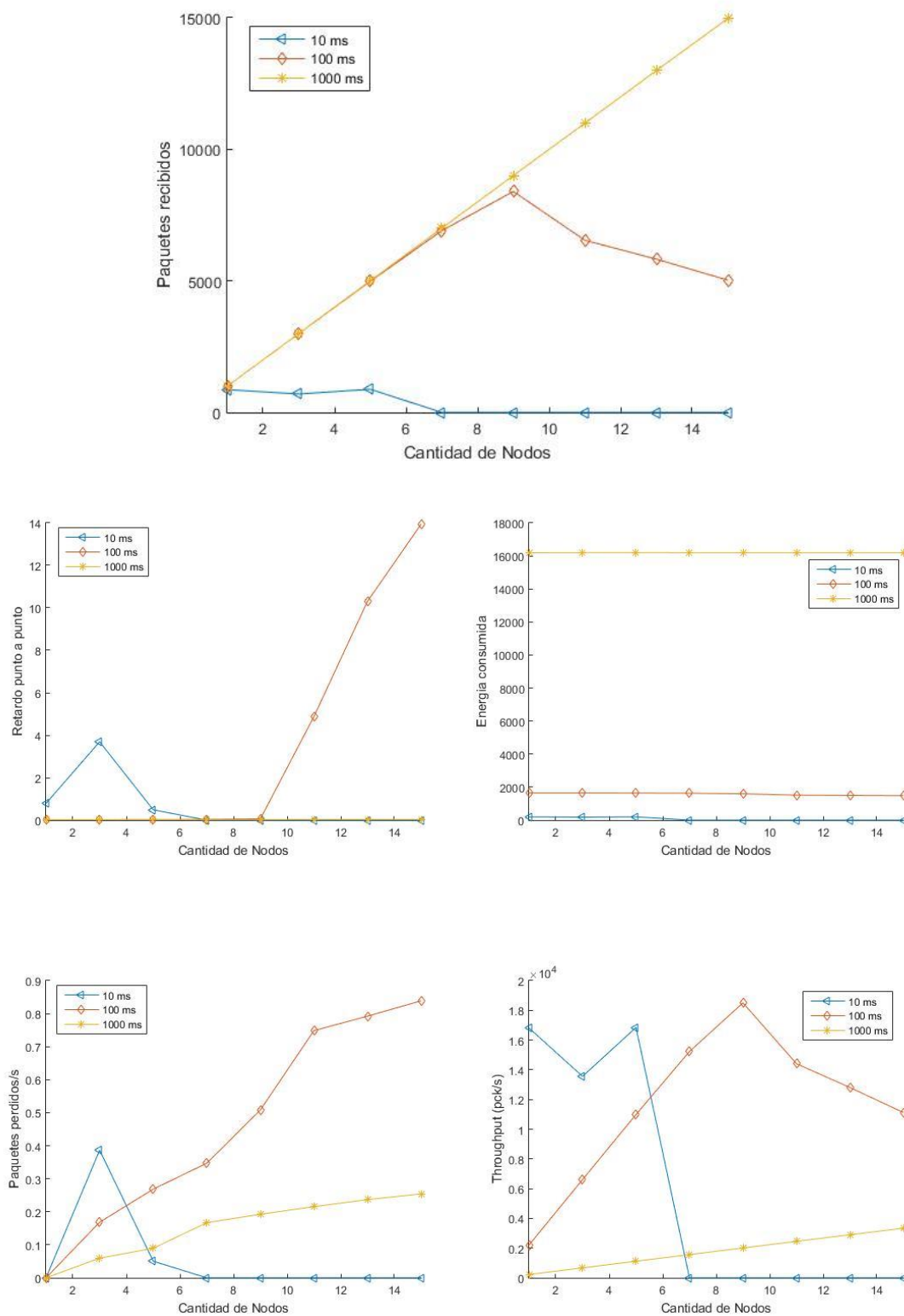


Figura 24 Resultados de los perfiles 4 y 5 en las pruebas de la fase II.1

Tabla 18 Resultados de las pruebas al perfil 4 de la fase II.1

| | #Nodos | rcvdPk | e2eDelay [s] | Consumo [mW] | LossRate [pcks/s] | Throughput [pcks/s] |
|---------|--------|--------|--------------|-----------------|----------------------|------------------------|
| 10 [ms] | 1 | 864 | 0.7909679 | 199.997 | 0.0000 | 75.128 |
| | 3 | 700 | 3.6916801 | 182.866 | 0.3865 | 60.867 |
| | 5 | 881 | 0.4877720 | 200.401 | 0.0504 | 76.606 |
| | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Nota: Para esta prueba el perfil fue configurado con un BO=1, un SO=0, con tramas de reconocimiento ACK, y con intervalo de envío de 10 [ms].

Tabla 19 Resultados de las pruebas al perfil 5 de la fase II.1

| | #Nodos | rcvdPk | e2eDelay [s] | Consumo [mW] | LossRate [pcks/s] | Throughput [pcks/s] |
|----------|--------|--------|--------------|-----------------|----------------------|------------------------|
| 100 [ms] | 1 | 1001 | 0.02426705 | 1648.1644 | 0.0000 | 9.859 |
| | 3 | 2999 | 0.02669024 | 1648.1644 | 0.1685 | 29.539 |
| | 5 | 4986 | 0.03048319 | 1640.8165 | 0.2685 | 49.110 |
| | 7 | 6909 | 0.03587101 | 1629.0522 | 0.3472 | 68.051 |
| | 9 | 8400 | 0.05937847 | 1594.3281 | 0.5083 | 82.737 |
| | 11 | 6544 | 4.87915428 | 1514.4657 | 0.7487 | 64.456 |
| | 13 | 5826 | 10.3082797 | 1497.1487 | 0.7923 | 57.384 |
| | 15 | 5026 | 13.9414243 | 1479.3893 | 0.8389 | 50.046 |

Nota: Para esta prueba el perfil fue configurado con un BO=3, un SO=2, con tramas de reconocimiento ACK, y con intervalo de envío de 100 [ms].

Tabla 20 Resultados de las pruebas al perfil 5 de la fase II.1

| | #Nodos | rcvdPk | e2eDelay [s] | Consumo [mW] | LossRate [pcks/s] | Throughput [pcks/s] |
|-----------|--------|--------|-----------------|-----------------|----------------------|------------------------|
| 1000 [ms] | 1 | 1001 | 0.0240606 | 16189.1 | 0.00000000 | 0.999 |
| | 3 | 3003 | 0.0240606 | 16199.7 | 0.05969938 | 2.998 |
| | 5 | 5005 | 0.0249817 | 16205.8 | 0.08945040 | 4.997 |
| | 7 | 7004 | 0.0265472 | 16195.4 | 0.16713850 | 6.993 |
| | 9 | 9002 | 0.0274269 | 16196.3 | 0.19252909 | 8.988 |
| | 11 | 10992 | 0.0286978 | 16196.9 | 0.21571078 | 10.974 |
| | 13 | 12992 | 0.0290578 | 16195.9 | 0.23685218 | 12.971 |
| | 15 | 114973 | 0.0295595 | 16196.5 | 0.25411347 | 14.949 |

Nota: Para esta prueba el perfil fue configurado con un BO=3, un SO=2, con tramas de reconocimiento ACK, y con intervalo de envío de 1000 [ms].

Los resultados de las simulaciones permitieron identificar el comportamiento de la red variando la cantidad de nodos, generando una idea sobre los límites máximos y mínimos de nodos RFD que pueden asociarse a un coordinador PAN según su frecuencia de envío de paquetes, en la mayoría de los casos el consumo de energía se mantuvo estable al aumentar la cantidad de nodos esto ya que el consumo de energía del coordinador está estrictamente ligado al tiempo de operación.

la cantidad de paquetes recibidos exitosamente permiten inferir que habilitar las tramas de reconocimiento ACK mejora el desempeño de la red, aunque aumente el retardo punto a punto de cada paquete generado por los nodos RFD, pese a que el perfil 2 mantuvo un tiempo de retardo punto a punto estable entre los 24 ms y 26 ms para los intervalos de envío de 100 ms y 1000 ms

sin ACK, el mayor porcentaje de paquetes recibidos exitosamente fue de 86% con tan solo 3 nodos RFD al sistema mientras que en el caso de la frecuencia de envío de paquetes de 1000 ms el porcentaje exitoso de paquetes llega a ser razonablemente mejor pudiendo ser cerca del 92.5% al soportar hasta 5 nodos.

Para el caso de los perfiles con el modo ACK activo el gran criterio que se debe evaluar es el retardo punto a punto, según los resultados puede verse que el intervalo de envío de paquetes de 100 ms tiene hasta un 93.24% de éxito con 9 nodos en la red, pero con un retardo punto a punto de 59.3ms siendo cerca del 59.3% de la frecuencia de envío lo cual no es favorable, además con más nodos su desempeño disminuye. Para el mismo perfil, pero con un intervalo de envío de 1000 ms el retardo disminuyó y se mantuvo entre los 24ms y los 30ms con un 99.7% de paquetes recibidos para hasta 15 nodos, este fue el mejor resultado conseguido en esta fase.

Debido a las grandes dificultades de desempeño que se notaron bajo las simulaciones de intervalos de envío de 10 ms, incluso variando la cantidad de nodos establecidos en la red, este valor de intervalo se omitirá en futuras pruebas, de manera que en la fase II.2 solo se pondrán a prueba los perfiles con las configuraciones en la Tabla 21.

Tabla 21 Configuración de los perfiles con los que se consiguió un mejor desempeño en la fase II.1.

| PERFIL | ACK | Modo CCA | BO | SO | SendInterval [ms] |
|--------|-----|-------------|----|----|----------------------|
| | | | | | 100 |
| 2 | No | 2 | 3 | 2 | 1000 |
| | | | | | 100 |
| 5 | Sí | 2 | 3 | 2 | 1000 |

4.2.2 Fase II.2 Desempeño del estándar aumentando la distancia entre los nodos y

el coordinador:

4.2.2.1 Simulación del Perfil 2 (sin ACK)

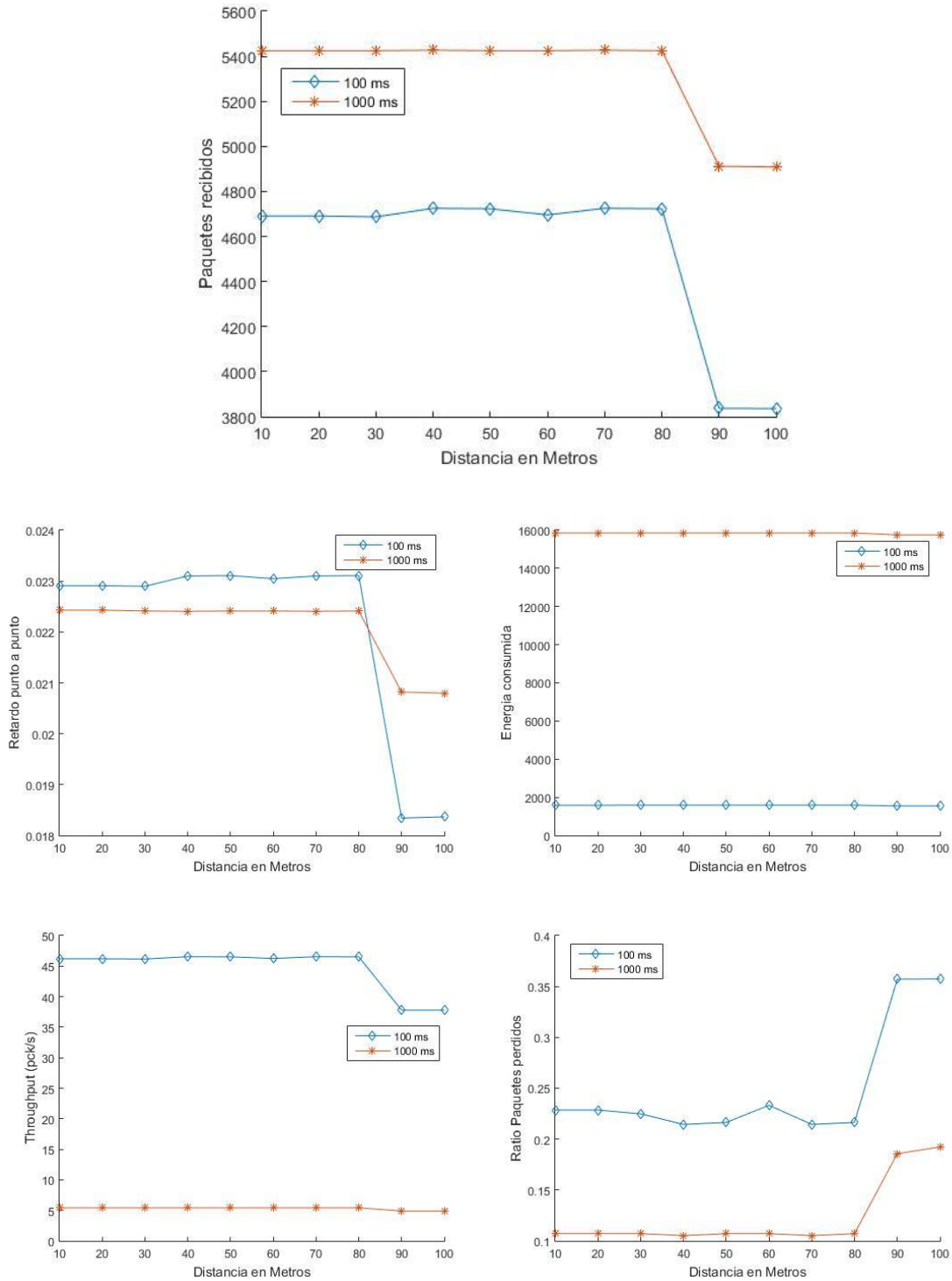


Figura 25 Resultados del perfil 2 fase II.2

Tabla 22 Resultados del perfil 2 a las pruebas de la fase II.2 con un intervalo de envío de 100 ms.

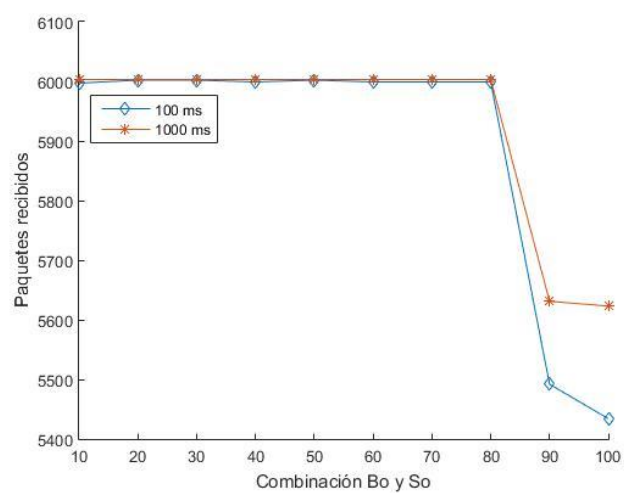
| | Distancia [m] | rcvdPk | E2E Delay | Consumed | LossRate | Throughput |
|-------|---------------|--------|-----------|----------|----------|------------|
| | | | [s] | [mW] | [pcks/s] | [pcks/s] |
| 100ms | 10 | 4691 | 0.02291 | 1,587.75 | 0.2286 | 46.205 |
| | 20 | 4691 | 0.02291 | 1,587.75 | 0.2286 | 46.205 |
| | 30 | 4687 | 0.0229 | 1,590.61 | 0.2249 | 46.166 |
| | 40 | 4725 | 0.0231 | 1,591.86 | 0.2144 | 46.54 |
| | 50 | 4723 | 0.02311 | 1,590.33 | 0.2164 | 46.52 |
| | 60 | 4696 | 0.02305 | 1,592.94 | 0.2333 | 46.254 |
| | 70 | 4725 | 0.0231 | 1,591.86 | 0.2144 | 46.54 |
| | 80 | 4723 | 0.02311 | 1,590.33 | 0.2164 | 46.52 |
| | 90 | 3837 | 0.01834 | 1,551.32 | 0.3572 | 37.794 |
| | 100 | 3836 | 0.01837 | 1,549.09 | 0.3574 | 37.784 |

Tabla 23 Resultados del perfil 2 a las pruebas de la fase II.2 con un intervalo de envío de 1000 ms.

| | Distancia [m] | rcvdPk | E2E Delay | Consumed | LossRate | Throughput |
|----|---------------|--------|-----------|-----------|----------|------------|
| | | | [s] | [mW] | [pcks/s] | [pcks/s] |
| 1s | 10 | 5425 | 0.02243 | 15,855.36 | 0.107 | 5.417 |
| | 20 | 5425 | 0.02243 | 15,855.36 | 0.107 | 5.417 |
| | 30 | 5425 | 0.02241 | 15,855.36 | 0.107 | 5.417 |
| | 40 | 5427 | 0.02241 | 15,856.89 | 0.105 | 5.419 |

| | | | | | |
|-----|------|---------|-----------|-------|-------|
| 50 | 5425 | 0.02241 | 15,855.36 | 0.107 | 5.417 |
| 60 | 5425 | 0.02241 | 15,855.36 | 0.107 | 5.419 |
| 70 | 5427 | 0.02241 | 15,856.89 | 0.105 | 5.419 |
| 80 | 5425 | 0.02241 | 15,855.36 | 0.101 | 5.417 |
| 90 | 4912 | 0.02082 | 15,752.47 | 0.185 | 4.904 |
| 100 | 4909 | 0.0208 | 15,753.96 | 0.192 | 4.901 |

4.2.2.2 Simulación del Perfil 5 (con ACK)



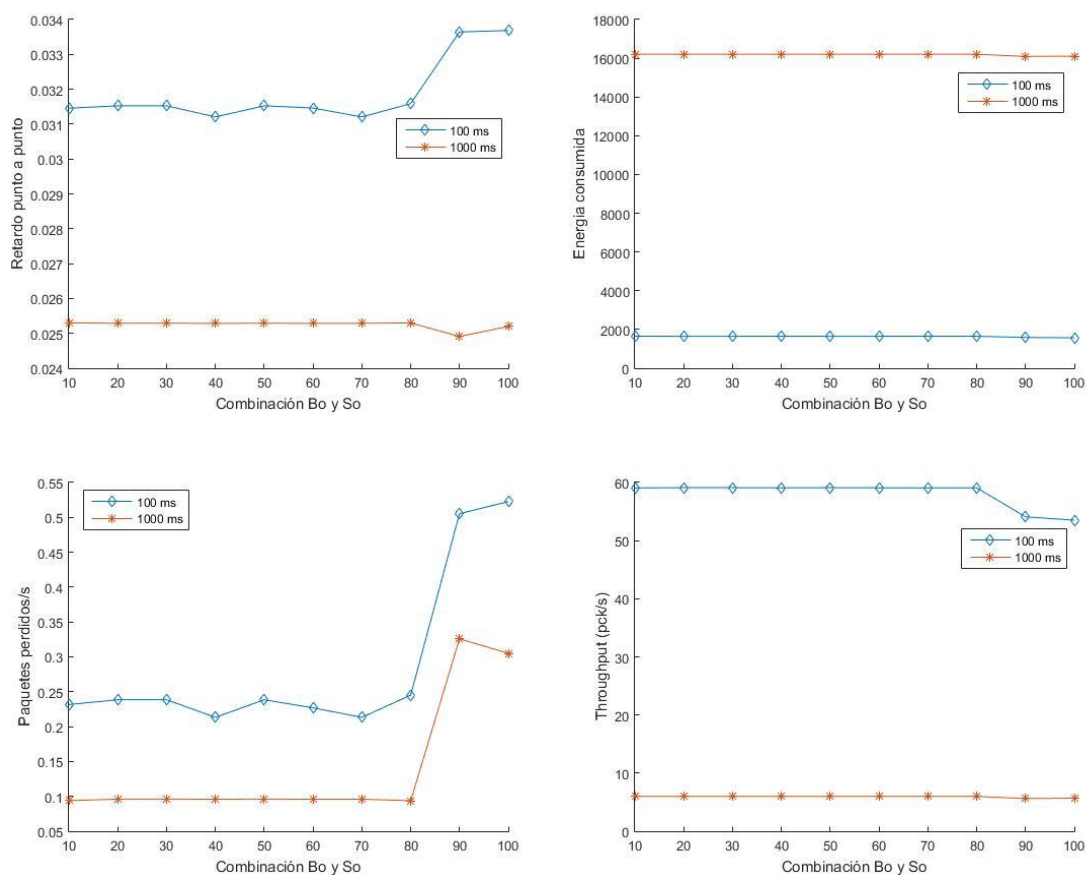


Figura 26 Resultados del desempeño del perfil 5, fase II.2

Tabla 24 Resultados del perfil 5 a las pruebas de la fase II.2 con un intervalo de envío de 100 ms.

| Distancia [m] | rcvdPk | E2E Delay | Consumo | LossRate | Throughput | |
|---------------|--------|-----------|---------|----------|------------|--------|
| | | [s] | [mW] | [pcks/s] | [pcks/s] | |
| 100ms | 10 | 5997 | 0.03146 | 1,650.40 | 0.232 | 59.069 |
| | 20 | 6002 | 0.03153 | 1,649.53 | 0.239 | 59.118 |
| | 30 | 6002 | 0.03153 | 1,649.53 | 0.239 | 59.118 |
| | 40 | 5999 | 0.03121 | 1,650.87 | 0.213 | 59.089 |

| | | | | | |
|-----|------|---------|----------|-------|--------|
| 50 | 6002 | 0.03153 | 1,649.56 | 0.239 | 59.118 |
| 60 | 5999 | 0.03146 | 1,649.82 | 0.227 | 59.089 |
| 70 | 5999 | 0.03121 | 1,650.82 | 0.213 | 59.089 |
| 80 | 5999 | 0.03159 | 1,649.97 | 0.245 | 59.089 |
| 90 | 5492 | 0.03364 | 1,588.25 | 0.505 | 54.095 |
| 100 | 5434 | 0.03369 | 1,570.91 | 0.523 | 53.52 |

Tabla 25 Resultados del perfil 5 a las pruebas de la fase II.2 con un intervalo de envío de 1000 ms.

| Distancia [m] | rcvdPk | E2E Delay | Consumo | LossRate | Throughput |
|---------------|--------|-----------|-----------|----------|------------|
| | | [s] | [mW] | [pcks/s] | [pcks/s] |
| 10 | 6003 | 0.0253 | 16,206.77 | 0.094 | 5.994 |
| 20 | 6003 | 0.02529 | 16,206.59 | 0.096 | 5.994 |
| 30 | 6003 | 0.02529 | 16,206.59 | 0.096 | 5.994 |
| 40 | 6003 | 0.02529 | 16,206.69 | 0.096 | 5.994 |
| 50 | 6003 | 0.02529 | 16,206.63 | 0.096 | 5.994 |
| 60 | 6003 | 0.02529 | 16,206.72 | 0.096 | 5.994 |
| 70 | 6003 | 0.02529 | 16,206.73 | 0.096 | 5.994 |
| 80 | 6003 | 0.0253 | 16,206.93 | 0.094 | 5.994 |
| 90 | 5631 | 0.02491 | 16,092.47 | 0.326 | 5.622 |
| 100 | 5623 | 0.0252 | 16,109.14 | 0.305 | 5.68 |

Los resultados muestran que a partir de los 90 metros de distancia el desempeño de la red tiende a caer, en todos los casos desde los 10 metros hasta los 90 metros se mantuvo un

rendimiento constante sin muchas variaciones a considerar, sin embargo las simulaciones sin tramas de reconocimiento ACK activo (correspondientes al perfil 2) nunca alcanzaron una tasa exitosa de paquetes recibidos superior al 90.3% ni dentro de su mejor rango de cobertura, en cambio el perfil con ACK habilitado consiguió un 99.9% de éxito a una distancia de 80 m con ambos intervalos de envío, de nuevo podemos notar la tendencia del modo ACK de blindar al sistema frente a la pérdida de paquetes inclusive si se varia la distancia de los nodos, el estándar reacciona muy bien frente al retardo punto a punto siendo en la mayoría de casos invariable en un rango de 10 a 100 metros de distancia de cobertura de señal.

4.3 Fase III Desempeño de la red con un ciclo útil de 100%

Para esta fase se ha planteado que se evaluará el desempeño del estándar asignándole a la supertrama un ciclo útil del 100%, para ello es necesario que el orden de beacon sea igual al orden de la supertrama tal y como se ha explicado anteriormente, considerando esto, los perfiles en esta fase cambiarán un poco y serán como se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26 Perfiles y configuración para las pruebas de la fase III.

| PERFIL | ACK | Modo CCA | BO | SO | SendInter val [ms] |
|--------|-----|-------------|----|----|-----------------------|
| 2 | No | 2 | 2 | 2 | 100 |
| | | | 3 | 3 | 1000 |
| 3 | Sí | 2 | 2 | 2 | 100 |
| | | | 3 | 3 | 1000 |

4.3.1 Fase III.1: Desempeño del estándar aumentando el número de nodos

4.3.1.1 Simulación perfil 2 (sin ACK)

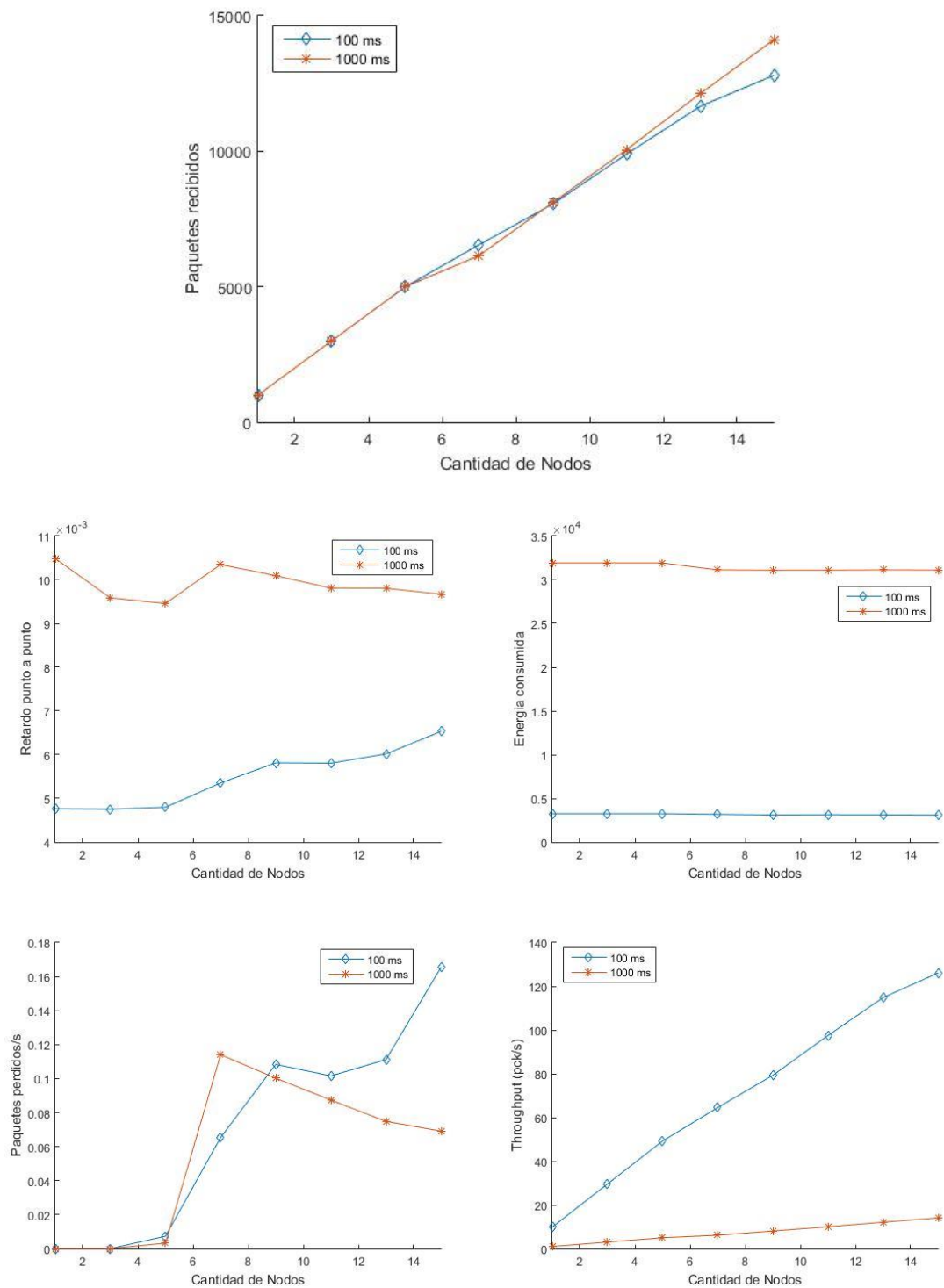


Figura 27 Resultados de las características de desempeño del perfil 2, fase III.1

Tabla 27 Resultados del perfil 2 a las pruebas de la fase III.1 con un intervalo de envío de 100 ms.

| | #Nodos | rcvdPk | E2E Delay | Consumo | LossRate | Throughput |
|----------|--------|--------|-----------|----------|----------|------------|
| | | | [s] | [mW] | [pcks/s] | [pcks/s] |
| 100 [ms] | 1 | 1,001 | 0.005 | 3,254.84 | 0 | 9.861 |
| | 3 | 3,003 | 0.005 | 3,254.90 | 0 | 29.584 |
| | 5 | 4,995 | 0.005 | 3,250.22 | 0.007 | 49.208 |
| | 7 | 6,549 | 0.005 | 3,181.76 | 0.065 | 64.517 |
| | 9 | 8,048 | 0.006 | 3,102.84 | 0.108 | 79.285 |
| | 11 | 9,892 | 0.006 | 3,134.26 | 0.102 | 97.451 |
| | 13 | 11,655 | 0.006 | 3,120.67 | 0.111 | 114.819 |
| | 15 | 12,799 | 0.007 | 3,094.20 | 0.166 | 126.089 |

Nota: recordemos que para estas pruebas el perfil se configuró con un ciclo útil igual a 100% y BO=2, SO=2

Tabla 28 Resultados del perfil 2 a las pruebas de la fase III.1 con un intervalo de envío de 1000 ms.

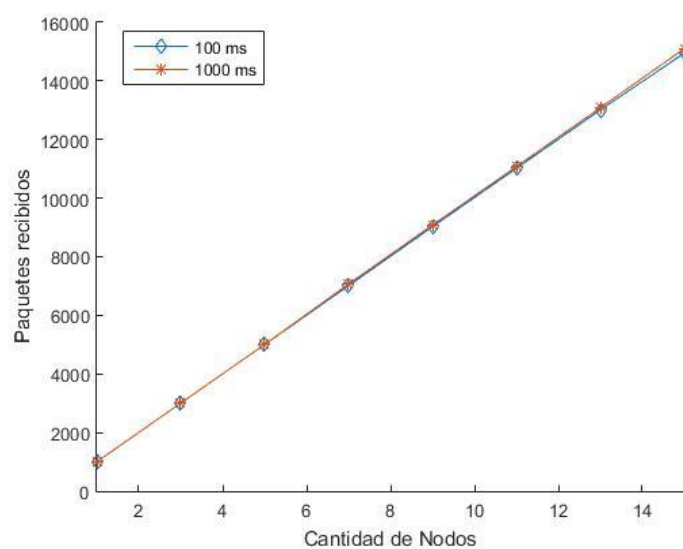
| | #Nodos | rcvdPk | E2E Delay | Consumo | LossRate | Throughput |
|-----------|--------|--------|-----------|-----------|----------|------------|
| | | | [s] | [mW] | [pcks/s] | [pcks/s] |
| 1000 [ms] | 1 | 1,001 | 0.01 | 31,921.76 | 0 | 0.999 |
| | 3 | 3,003 | 0.01 | 31,921.82 | 0 | 2.998 |
| | 5 | 5,001 | 0.009 | 31,921.37 | 0.003 | 4.993 |
| | 7 | 6,149 | 0.01 | 31,127.57 | 0.114 | 6.14 |
| | 9 | 8,101 | 0.01 | 31,090.08 | 0.1 | 8.089 |
| | 11 | 10,055 | 0.01 | 31,092.52 | 0.087 | 10.04 |

| | | | | | |
|----|--------|------|-----------|-------|--------|
| 13 | 12,123 | 0.01 | 31,124.42 | 0.075 | 12.104 |
| 15 | 14,113 | 0.01 | 31,109.06 | 0.069 | 14.091 |

Nota: recordemos que para estas pruebas el perfil se configuró con un ciclo útil igual a 100%

y BO=3, SO=3

4.3.1.2 Simulación perfil 5 (con ACK)



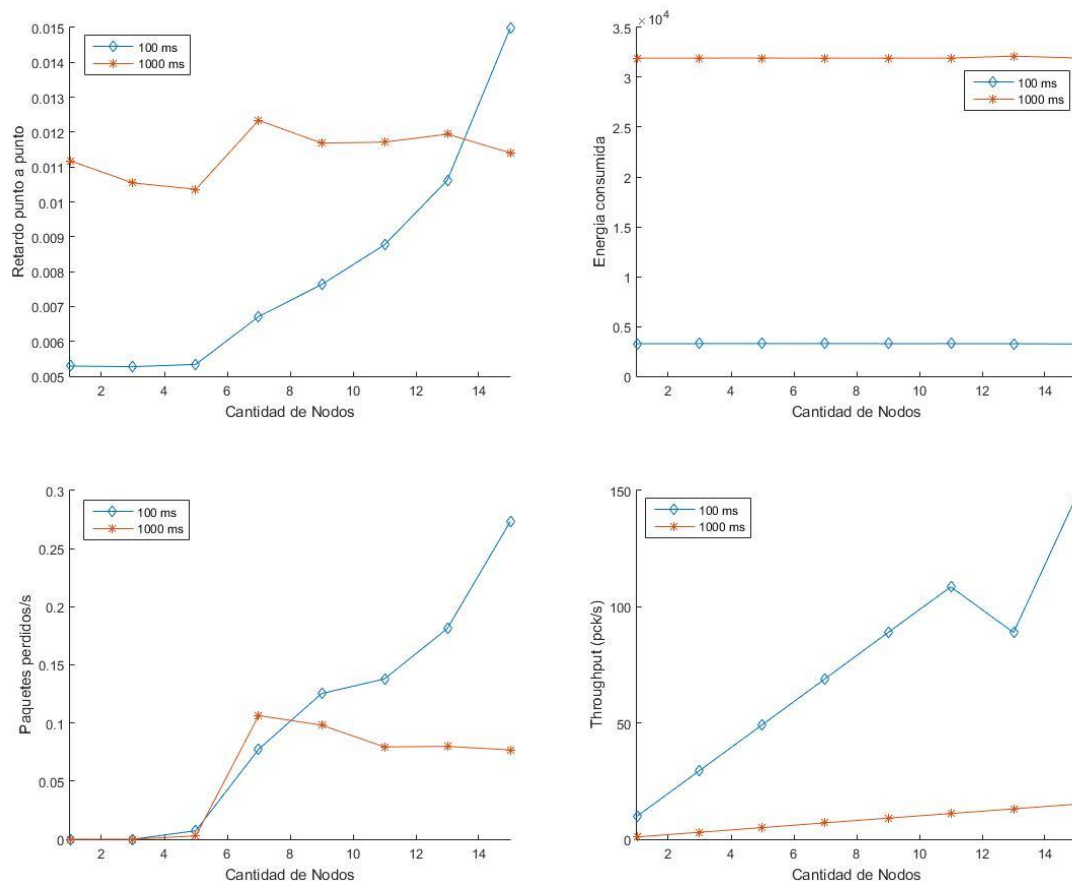


Figura 28 Resultados de las características de desempeño del perfil 5, fase III.1

Tabla 29 Resultados del perfil 5 con intervalo de envío de 100 [ms] fase III.1

| | #Nodos | rcvdPk | E2E Delay | Consumo | LossRate | Throughput |
|----------|--------|--------|-----------|----------|----------|------------|
| | | | [s] | [mW] | [pcks/s] | [pcks/s] |
| 100 [ms] | 1 | 1,001 | 0.005291 | 3,260.61 | 0.00 | 9.861 |
| | 3 | 3,003 | 0.005273 | 3,272.20 | 0.00 | 29.583 |
| | 5 | 5,005 | 0.00534 | 3,283.34 | 0.007 | 49.306 |
| | 7 | 7,012 | 0.006712 | 3,277.62 | 0.077 | 69.078 |

| | | | | | |
|----|--------|----------|----------|-------|--------|
| 9 | 9,025 | 0.007629 | 3,270.56 | 0.125 | 88.909 |
| 11 | 11,019 | 0.008766 | 3,272.09 | 0.138 | 108.55 |
| 13 | 13,010 | 0.010621 | 3,263.82 | 0.181 | 88.909 |
| 15 | 14,948 | 0.014978 | 3,231.99 | 0.273 | 147.26 |

Nota: recordemos que para estas pruebas el perfil se configuró con un ciclo útil igual a 100% y BO=2, SO=2

Tabla 30 Resultados del perfil 5 con intervalo de envío de 1000 [ms] fase III.

| | #Nodos | rcvdPk | E2E Delay | Consumo | LossRate | Throughput |
|-----------|--------|--------|-----------|-----------|----------|------------|
| | | | [s] | [mW] | [pcks/s] | [pcks/s] |
| 1000 [ms] | 1 | 1,001 | 0.011179 | 31,924.64 | 0.00 | 0.999 |
| | 3 | 3,003 | 0.010543 | 31,930.43 | 0.00 | 2.998 |
| | 5 | 5,005 | 0.01036 | 31,936.13 | 0.003 | 4.997 |
| | 7 | 7,068 | 0.012338 | 31,921.23 | 0.106 | 7.057 |
| | 9 | 9,082 | 0.011686 | 31,923.88 | 0.098 | 9.068 |
| | 11 | 11,078 | 0.011713 | 31,927.95 | 0.079 | 11.061 |
| | 13 | 13,085 | 0.01194 | 32,128.96 | 0.08 | 13.065 |
| | 15 | 15,103 | 0.011407 | 31,937.80 | 0.077 | 15.079 |

Nota: recordemos que para estas pruebas el perfil se configuró con un ciclo útil igual a 100% y BO=3, SO=3

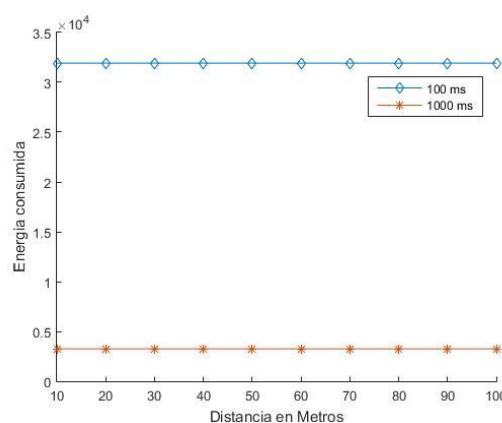
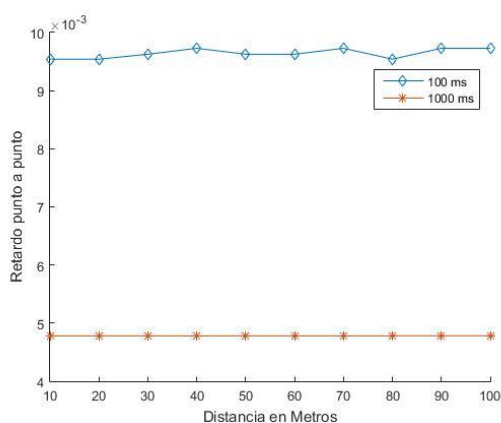
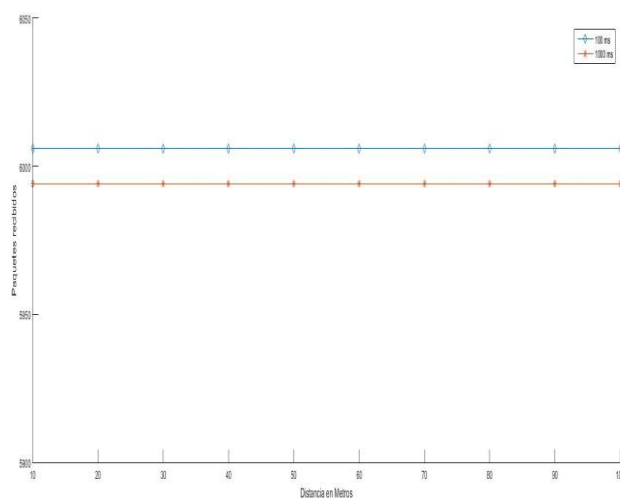
En los perfiles sin ACK activo bajo un ciclo útil del 100% se hace notoria la tendencia a la optimización de las características de calidad de la red, para el caso de una frecuencia de intervalo de envío de 100 ms, se mantuvo un retardo punto a punto entre los 5ms a 7ms frente a los límites de 24ms y 27ms del ciclo útil del 50%, sin duda, la característica que más aquejaba a

los perfiles sin ACK es su baja tasa de exitosa de paquetes recibidos por el nodo coordinador, para este modo de operación se logró hasta 99.8% de éxito con 5 nodos en la frecuencia de envío de paquetes mencionada.

En los perfiles con ACK activo sorprendentemente se obtuvo un 99.5% de efectividad de paquetes recibidos en el peor de los casos para una frecuencia de envío de paquetes de 100ms y 15 nodos, siendo el mejor resultado en todas las pruebas logradas y olvidando que el retardo punto a punto sea un problema fluctuando entre los 5ms y 15ms en las pruebas realizadas.

4.3.2 Fase III.2: Desempeño del estándar aumentando la distancia entre los nodos y el coordinador.

4.3.2.1 Simulación perfiles sin ACK



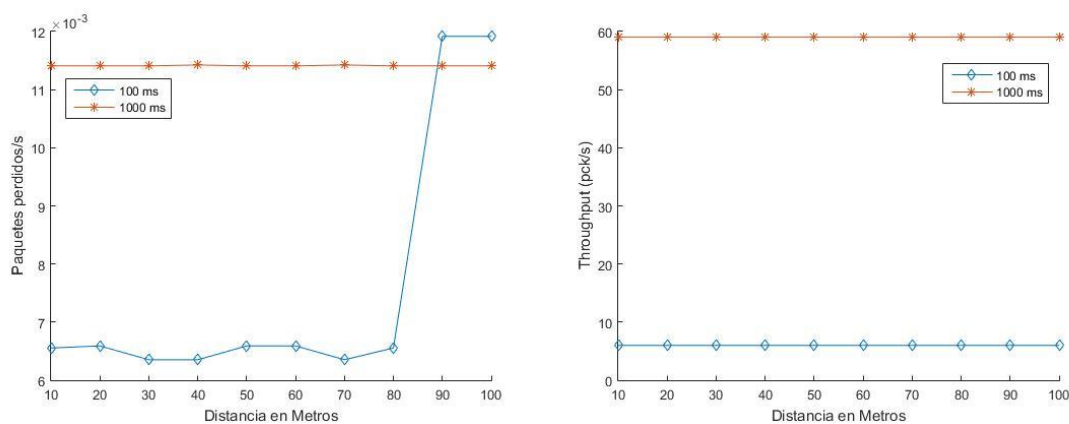


Figura 29 Resultados del desempeño perfil 2, fase III.2

Tabla 31 Resultados del perfil 2 con intervalo de envío de 100 [ms] fase III.2

| | Distancia | E2E Delay | Consumo | LossRate | Throughput | |
|----------|-----------|------------|-----------|----------|------------|---------|
| | [m] | rcvdPk [s] | [mW] | [pcks/s] | [pcks/s] | |
| 100 [ms] | 10 | 5,994 | 0.0047813 | 3,252.56 | 0.01 | 59.0497 |
| | 20 | 5,994 | 0.0047814 | 3,252.56 | 0.01 | 59.0497 |
| | 30 | 5,994 | 0.0047815 | 3,252.56 | 0.0114 | 59.0497 |
| | 40 | 5,994 | 0.0047789 | 3,252.56 | 0.0114 | 59.0497 |
| | 50 | 5,994 | 0.0047816 | 3,252.56 | 0.0114 | 59.0497 |
| | 60 | 5,994 | 0.0047817 | 3,252.56 | 0.0114 | 59.0497 |
| | 70 | 5,994 | 0.0047791 | 3,252.56 | 0.0114 | 59.0497 |
| | 80 | 5,994 | 0.0047818 | 3,252.56 | 0.0114 | 59.0497 |
| | 90 | 5994 | 0.0047819 | 3,252.56 | 0.0114 | 59.0497 |
| | 100 | 5994 | 0.0047819 | 3,252.56 | 0.0114 | 59.0497 |

Tabla 32 Resultados del perfil 2 con intervalo de envío de 1000 [ms] fase III.2

| | Distancia | E2E Delay | Consumo | LossRate | Throughput |
|-----------|-----------|--------------------|-----------|----------|------------|
| | [m] | rcvdPk [s] | [mW] | [pcks/s] | [pcks/s] |
| 1000 [ms] | 10 | 6006 0.00980967 | 32,112.89 | 0.0045 | 5.997 |
| | 20 | 6006 0.00980967 | 32,112.89 | 0.0045 | 5.997 |
| | 30 | 6006 0.00980986 | 32,112.89 | 0.0045 | 5.997 |
| | 40 | 6006 0.00981938 | 32,112.89 | 0.0045 | 5.997 |
| | 50 | 6006 0.00980993 | 32,112.89 | 0.0045 | 5.997 |
| | 60 | 6006 0.00980993 | 32,112.89 | 0.0045 | 5.997 |
| | 70 | 6006 0.00981958 | 32,112.89 | 0.0045 | 5.997 |
| | 80 | 6006 0.00981013 | 32,112.89 | 0.0045 | 5.997 |
| | 90 | 6006 0.00981013 | 32,112.89 | 0.0045 | 5.997 |
| | 100 | 6006 0.00981013 | 32,112.89 | 0.0045 | 5.997 |

4.3.2.2 Simulación perfiles con ACK

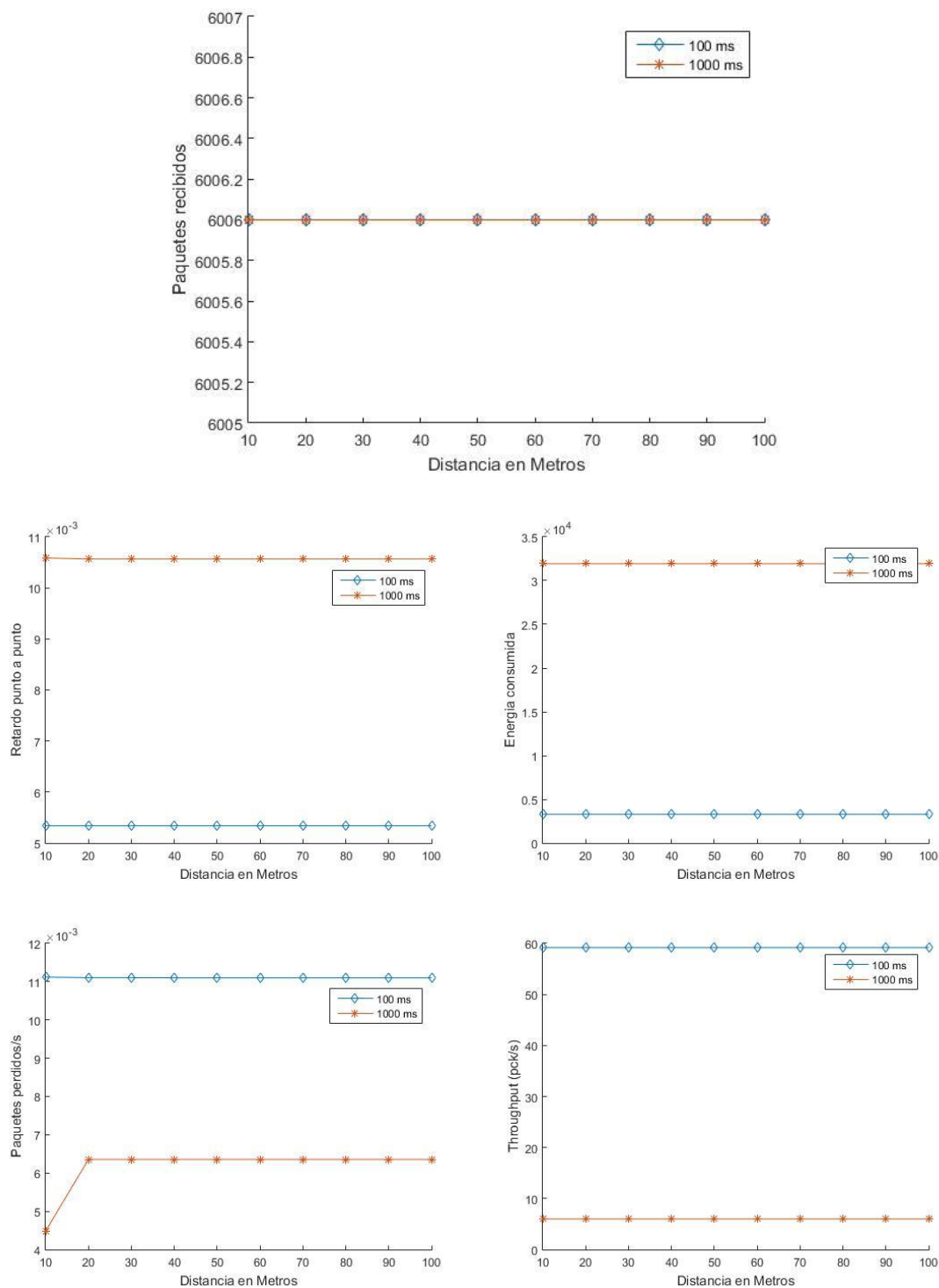


Figura 30 Resultados de desempeño perfil 5, fase III.2

Tabla 33 Resultados del perfil 5 con intervalo de envío de 100 [ms] fase III.2

| | Distancia | rcvdPk | E2E Delay | Consumo | LossRate | Throughput |
|-----------|-----------|--------|------------|----------|-----------|------------|
| | [m] | | [s] | [mW] | [pcks/s] | [pcks/s] |
| 1000 [ms] | 10 | 6006 | 0.00533941 | 3,288.85 | 0.0111189 | 59.16792 |
| | 20 | 6006 | 0.00533872 | 3,288.86 | 0.0111036 | 59.16792 |
| | 30 | 6006 | 0.00533872 | 3,288.86 | 0.0111036 | 59.16792 |
| | 40 | 6006 | 0.00533872 | 3,288.88 | 0.0111003 | 59.16792 |
| | 50 | 6006 | 0.00533872 | 3,288.88 | 0.0111003 | 59.16792 |
| | 60 | 6006 | 0.00533872 | 3,288.88 | 0.0111003 | 59.16792 |
| | 70 | 6006 | 0.00533872 | 3,288.88 | 0.0111003 | 59.16792 |
| | 80 | 6006 | 0.00533872 | 3,288.88 | 0.0111003 | 59.16792 |
| | 90 | 6006 | 0.00533872 | 3,288.88 | 0.0111003 | 59.16792 |
| | 100 | 6006 | 0.00533872 | 3,288.88 | 0.0111003 | 59.16792 |

Tabla 34 Resultados del perfil 5 con intervalo de envío de 1000 [ms] fase III.2

| | Distancia | rcvdPk | E2E Delay | Consumo | LossRate | Throughput |
|-----------|-----------|--------|------------|-----------|----------|------------|
| | [m] | | [s] | [mW] | [pcks/s] | [pcks/s] |
| 1000 [ms] | 10 | 6006 | 0.01058709 | 31,939.07 | 0.004485 | 5.996761 |
| | 20 | 6006 | 0.01056678 | 31,939.03 | 0.006355 | 5.996761 |
| | 30 | 6006 | 0.01056678 | 31,939.03 | 0.006355 | 5.996761 |
| | 40 | 6006 | 0.01056678 | 31,939.05 | 0.006355 | 5.996761 |
| | 50 | 6006 | 0.01056678 | 31,939.05 | 0.006355 | 5.996761 |
| | 60 | 6006 | 0.01056678 | 31,939.05 | 0.006355 | 5.996761 |
| | 70 | 6006 | 0.01056678 | 31,939.05 | 0.006355 | 5.996761 |

| | | | | | |
|-----|------|------------|-----------|----------|----------|
| 80 | 6006 | 0.01056678 | 31,939.05 | 0.006355 | 5.996761 |
| 90 | 6006 | 0.01056678 | 31,939.05 | 0.006355 | 5.996761 |
| 100 | 6006 | 0.01056678 | 31,939.05 | 0.006355 | 5.996761 |

Finalmente, el ciclo útil mantiene blindada la red ante las variaciones de distancias radiales con respecto al nodo coordinador, con este modo de funcionamiento no se precisaría de disminuir las distancias de ubicación de nodos, inferiores a los 90 metros como lo habían arrojado los resultados de las pruebas realizadas con un ciclo útil del 50%.

4.4 Formalización de los análisis de resultados

Frente a la gran cantidad de resultados conseguidos en las pruebas realizadas, se ha conseguido una diversidad de análisis sobre el desempeño del estándar que puede ser una guía para delimitar la cantidad de nodos de la red y las distancias máximas que pueden usarse sin afectar el rendimiento. Esta sección busca concretar configuraciones basadas en los análisis de los resultados de las fases anteriores para mostrar a modo de conclusión el mejor desempeño de una red basada en el estándar, brindándole al lector la posibilidad de conocer cuál es su comportamiento en base a diferentes condiciones de calidad para finalmente sugerir bajo qué circunstancias, cantidad de nodos y distancias máximas se verían los mejores resultados.

Tabla 35 Configuraciones recomendadas

| Configuración | BO | SO | Modo CCA | Intervalo de envío | ACK | # Nodos | Distancia Max |
|---------------|----|----|----------|--------------------|-----|---------|---------------|
| 1 | 3 | 2 | 2 | 100 | No | 1 | 80 |
| 2 | 3 | 2 | 2 | 1000 | No | 3 | 80 |
| 3 | 3 | 2 | 2 | 100 | Sí | 7 | 80 |
| 4 | 3 | 2 | 2 | 1000 | Sí | 15 | 80 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|------|----|----|-----|
| 5 | 2 | 2 | 2 | 100 | No | 5 | 100 |
| 6 | 3 | 3 | 2 | 1000 | No | 5 | 100 |
| 7 | 2 | 2 | 2 | 100 | Sí | 15 | 100 |
| 8 | 3 | 3 | 2 | 1000 | Sí | 15 | 100 |

Tabla 36 Resultados del estándar a las configuraciones recomendadas

| Configuraci ón | eficiencia [%] | E2E Delay [s] | Consumo [mW] | LossRate [pcks/s] | Throughput [pcks/s] | Throughput [bits/s] |
|-------------------|-------------------|------------------|-----------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | 100 | 0.023 | 1640.43 | 0 | 9.86 | 2206.34 |
| 2 | 97.2 | 0.023 | 16116.94 | 0.0326 | 2.91 | 652.17 |
| 3 | 99.7 | 0.034 | 1644.49 | 0.2554 | 68.79 | 15393.67 |
| 4 | 100 | 0.029 | 16223.47 | 0.1893 | 15.00 | 3351.89 |
| 5 | 99.8 | 0.005 | 3250.22 | 0.0073 | 49.21 | 11011.58 |
| 6 | 100.0 | 0.009 | 31921.64 | 0.0029 | 5.00 | 1117.83 |
| 7 | 99.5 | 0.015 | 3228.71 | 0.2788 | 147.20 | 32924.39 |
| 8 | 100 | 0.011 | 31938.60 | 0.0728 | 15.08 | 3375.63 |

5 Conclusiones

- Se considera viable el uso del estándar IEEE 802.15.4 como base para la implementación de una red de comunicación inalámbrica en una micro red eléctrica, los resultados y sus análisis son prueba de que se puede configurar el estándar para conseguir una comunicación de buen desempeño, de calidad, confiable y segura.
- Nuestros resultados del retardo punto a punto le aportan al sistema de control centralizado periodos de muestreo de las variables de la micro red eléctrica de entre 9.89 y 68.9 milisegundos, permitiendo que la recolección y envío de información sea rápida y junto con la estructura del estándar el flujo de la información es eficaz y segura.
- El ciclo útil del 100% es superior en rendimiento frente al del 50%, pero debido a que no existe una zona inactiva durante las transmisiones, el consumo en todos los casos llega a ser superior al 200% por tal motivo se recomienda emplear este ciclo útil en aplicaciones en donde los dispositivos tomen la energía directamente de la red y no de una batería.
- Para diseños de futuras redes de comunicación inalámbrica basadas en este estándar se recomienda usar ordenes de la trama de beacon y la supertrama entre 2 y 10, ya para ordenes muy pequeños o muy grandes el desempeño de la red siempre tiende a empeorar.
- En la mayoría de los casos los perfiles de simulación que usaron tramas de reconocimiento ACK consiguieron la mayor tasa de paquetes recibidos exitosamente, a pesar del retardo punto a punto causado por el reenvío de paquetes que se pierden, recomendamos para futuros diseños de una red basada este estándar optar por un perfil de configuración que incluya estas tramas.

Referencias bibliográficas

- Chen, F., Wang, N., Falko, D., & German, R. (2009). Simulation study of IEEE 802.15.4 LR-WPAN for industrial applications. *Wireless Communications and Mobile Computing*, (February 2015), 421–430. <http://doi.org/10.1002/wcm>
- Díaz Andrade, C. A., & Hernández, J. C. (2011). Smart Grid: Las TICs y la modernización de las redes de energía eléctrica-Estado del Arte. *Sistemas y Telemática (S&T)*, 9, 53–81. Retrieved from http://bibliotecadigital.icesi.edu.co/biblioteca_digital/handle/10906/5654
- Hatziargyriou, N. (IEEE). (2014). *Microgrid : architectures and control*. (N. Hatziargyriou, Ed.) (first). Athens, Greece. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/store/10.1002/9781118720677.fmatter/asset/fmatter.pdf?v=1&t=j9lonf9x&s=019346c6f0e223ec2ab0f44c115c7ac9e7e4c3a8>
- IEEE/ComputerSociety. (2006). *IEEE Standard for Telecommunications and information Local and metropolitan area networks — Specific requirements Part 15 . 4 : Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks* (. (S. Man/LAN Committee & I. Computer, Eds.) (Vol. 2006).
- Mahmoud, M. S., & Rahman, M. S. U. (2016). Event triggered of microgrid control with communication and control optimization. *Journal of the Franklin Institute*, 353(16), 4114–4132. <http://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2016.08.003>
- UNICEN. (2009). El modelo OSI. *El Modelo OSI*.
- (ZigBee Alliance). (2014). *ZigBee Network Protocols and Applications*. (C. Wang, T. Jiang, & Q. Zhang, Eds.) (First edit). ZigBee Alliance.