

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica



TESIS DE MAESTRÍA

Análisis de desempeño del protocolo MAC del estándar IEEE 802.15.4

Tesis presentada en opción al grado de
Máster en Telemática

Autor: Ing. Carlos M. García Algora

Tutor: Dr. CT. Vitalio Alfonso Reguera

Santa Clara

2014

“Año 56 de la Revolución”

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica



TESIS DE MAESTRÍA

Análisis de desempeño del protocolo MAC del estándar IEEE 802.15.4

Tesis presentada en opción al grado de
Máster en Telemática

Autor: Ing. Carlos M. García Algora
cgalgora@uclv.edu.cu

Tutor: Dr. CT. Vitalio Alfonso Reguera Prof. Titular
Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, UCLV
email: vitalio@uclv.edu.cu

Santa Clara

2014

“Año 56 de la Revolución”



Hago constar que la presente Tesis de Maestría fue realizada en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la Maestría en Telemática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Ing. Carlos M. García Algora
Autor

Fecha

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Ing. Carlos M. García Algora
Autor

Fecha

Vitalio Alfonso Reguera, Dr.CT
Jefe del Departamento

Fecha

Félix J. Álvarez Paliza, Dr.CT
Coordinador de la Maestría en Telemática

Fecha

DEDICATORIA

A mi madre y mi hermano,
sin ustedes estas palabras no existirían

A mi familia,
por todo lo que hicieron para que esto fuera posible

A mis amigos,
por el apoyo y la comprensión en todo momento

A los profesores,
por el ejemplo y la dedicación

AGRADECIMIENTOS

Agradecer fundamentalmente a mi tutor, Vitalio, porque su guía y ayuda fueron fundamentales en todo momento. A Erik Ortiz, por su apoyo y ayuda incondicional en todo momento.

Por supuesto, agradecimiento infinito a mi familia, en especial a mi madre y mi hermano, porque estuvieron a mi lado en todo el proceso e hicieron grandes sacrificios en función de mi trabajo.

No podrían faltar aquí mis amigos quienes me soportaron en los momentos más difíciles y me apoyaron en todo.

A la Universidad, la Facultad de Ingeniería Eléctrica y mis compañeros de trabajo que son más que una escuela y un centro de trabajo, mi agradecimiento siempre por lo mucho que me han aportado como profesional y como ser humano.

RESUMEN

Las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) se han convertido en un área de investigación de gran interés por sus innumerables aplicaciones en la ciencia y en la sociedad. Las características particulares de este tipo de redes han requerido el diseño de nuevos protocolos para su implementación en todos los niveles de su arquitectura de red. Debido a que la interfaz de radio es el más alto consumidor de la escasa energía disponible en los nodos WSN, uno de los focos principales de investigación en WSN han sido los protocolos MAC pues estos gobiernan el comportamiento de la interfaz de radio. En los últimos 15 años la IEEE ha propuesto y actualizado el estándar IEEE 802.15.4, el cual define la capa física y MAC de las Redes Inalámbricas de Área Personal de Baja Tasa de Transmisión (LR-WPAN). En este estándar se define un protocolo MAC destinado a ser el estándar de facto para WSN y, por tanto, se vuelve imperativo el estudio de su desempeño ante diferentes condiciones de la red.

En este trabajo se realiza un análisis de desempeño del protocolo MAC IEEE 802.15.4 a través de simulación usando el simulador Castalia/OMNeT++. Este análisis se enfoca en el efecto sobre el desempeño del protocolo de la carga de tráfico y la interferencia. Para ello se define un modelo de simulación y se diseñan cuatro escenarios para comprobar el desempeño del protocolo bajo diferentes condiciones de carga de tráfico, densidad de nodos dentro de la red, niveles de Ciclo Útil de Radio (RDC) de los nodos, y niveles de interferencia externa. Los resultados de simulación de estos escenarios demuestran que el protocolo IEEE 802.15.4 tiene buen desempeño cuando los niveles de carga de tráfico, densidad de nodos, RDC e interferencia son bajos. Sin embargo, el presente estudio demuestra que la degradación del desempeño del protocolo a medida que aumentan los parámetros anteriores está influenciada por algunas características propias del protocolo IEEE 802.15.4, como el empleo de CSMA/CA y la comunicación basada en ACK.

TABLA DE CONTENIDO

| | <u>Página</u> |
|--|---------------|
| DEDICATORIA | I |
| AGRADECIMIENTOS | II |
| RESUMEN | III |
| ÍNDICE DE TABLAS | VII |
| ÍNDICE DE FIGURAS | IX |
| LISTA DE ABREVIATURAS | XI |
| LISTA DE SÍMBOLOS | XII |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1. CARACTERÍSTICAS DE LA CAPA MAC EN WSN | 5 |
| 1.1. Características de las WSN | 5 |
| 1.1.1. Disponibilidad de recursos en los nodos WSN | 7 |
| 1.1.2. Patrones de tráfico en WSN | 8 |
| 1.2. Características de la capa MAC en WSN | 9 |
| 1.2.1. Fuentes de consumo adicional de recursos | 10 |
| 1.2.2. Principales tendencias de diseño de protocolos MAC para WSN . | 11 |
| 1.3. Estándar IEEE 802.15.4 | 14 |
| 1.3.1. Protocolo MAC del estándar IEEE 802.15.4 | 16 |
| 1.4. Consideraciones finales | 20 |
| 2. PROTOCOLO MAC IEEE 802.15.4 EN CASTALIA/OMNET++ | 21 |
| 2.1. Selección del simulador Castalia/OMNeT++ | 21 |
| 2.1.1. Características del simulador Castalia/OMNeT++ | 23 |
| 2.2. Modelo de simulación | 26 |
| 2.2.1. Canal Inalámbrico | 26 |

| | | |
|--------|--|----|
| 2.2.2. | Módulo de Radio | 27 |
| 2.2.3. | Módulo MAC | 28 |
| 2.2.4. | Módulo de Aplicación | 29 |
| 2.3. | Escenarios de Simulación | 29 |
| 2.3.1. | Escenario 1: Carga de Tráfico | 30 |
| 2.3.2. | Escenario 2: Densidad de Nodos | 31 |
| 2.3.3. | Escenario 3: Niveles de RDC | 31 |
| 2.3.4. | Escenario 4: Interferencia Externa | 33 |
| 2.4. | Consideraciones finales del capítulo | 34 |
| 3. | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 35 |
| 3.1. | Escenario 1: Carga de Tráfico | 35 |
| 3.2. | Escenario 2: Densidad de Nodos | 38 |
| 3.3. | Escenario 3: Niveles de RDC | 42 |
| 3.4. | Escenario 4: Interferencia | 44 |
| 3.5. | Consideraciones finales del capítulo | 47 |
| | CONCLUSIONES | 49 |
| | RECOMENDACIONES | 51 |
| | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 56 |
| | ANEXOS | 56 |
| | ANEXO | 56 |
| A. | ARCHIVOS DE CONFIGURACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN. | 57 |
| A.1. | Escenario 1: Carga de Tráfico | 57 |
| A.2. | Escenario 2: Densidad de Nodos | 58 |
| A.3. | Escenario 3: Niveles de RDC | 59 |
| A.4. | Escenario 4: Interferencia Externa | 60 |
| A.4.1. | Escenario 4.1 | 60 |
| A.4.2. | Escenario 4.2 | 61 |
| B. | VALIDEZ ESTADÍSTICA DE LOS RESULTADOS DE SIMULACIÓN | 62 |

| | | |
|------|--|----|
| B.1. | Escenario 1: Carga de Tráfico | 63 |
| B.2. | Escenario 2: Densidad de Nodos | 64 |
| B.3. | Escenario 3: Niveles de RDC | 65 |
| B.4. | Escenario 4: Interferencia Externa | 66 |
| | B.4.1. Escenario 4.1 | 66 |
| | B.4.2. Escenario 4.2 | 67 |

ÍNDICE DE TABLAS

| Tabla | Página |
|--|--------|
| 1-1. Plataformas para WSN. | 8 |
| 2-1. Parámetros generales de la red. | 26 |
| 2-2. Parámetros del módulo de Canal Inalámbrico. | 27 |
| 2-3. Parámetros del módulo de Radio. | 28 |
| 2-4. Parámetros del módulo MAC. | 29 |
| 2-5. Parámetros del módulo de Aplicación. | 29 |
| 2-6. Parámetros del escenario de simulación 1. | 31 |
| 2-7. Parámetros del escenario de simulación 2. | 31 |
| 2-8. RDC en función de los parámetros <code>beaconOrder</code> y <code>frameOrder</code> | 32 |
| 2-9. Parámetros del escenario de simulación 3. | 33 |
| 2-10. Parámetros de los escenarios de simulación 4.1 y 4.2. | 34 |
| B-1. Paquetes transmitidos promedio a nivel de Radio. | 63 |
| B-2. Paquetes recibidos promedio a nivel de Aplicación. | 63 |
| B-3. Resultados de las transmisiones a nivel de Radio. | 63 |
| B-4. Resultados de las transmisiones a nivel MAC. | 64 |
| B-5. Paquetes transmitidos promedio a nivel de Radio. | 64 |
| B-6. Paquetes recibidos promedio a nivel de Aplicación. | 64 |
| B-7. Resultados de las transmisiones a nivel de Radio. | 64 |
| B-8. Resultados de las transmisiones a nivel MAC. | 64 |

| | |
|--|----|
| B-9. Resultados de las transmisiones a nivel MAC. | 65 |
| B-10Energía promedio consumida por cada nodo. | 65 |
| B-11Paquetes transmitidos promedio a nivel de Radio. | 66 |
| B-12Paquetes recibidos promedio a nivel de Aplicación. | 66 |
| B-13Resultados de las transmisiones a nivel MAC. | 66 |
| B-14Energía promedio consumida por cada nodo. | 66 |
| B-15Paquetes transmitidos promedio a nivel de Radio. | 67 |
| B-16Paquetes recibidos promedio a nivel de Aplicación. | 67 |
| B-17Resultados de las transmisiones a nivel MAC. | 67 |
| B-18Energía promedio consumida por cada nodo. | 67 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| <u>Figura</u> | <u>Página</u> |
|--|---------------|
| 1-1. Arquitectura del estándar IEEE 802.15.4. | 15 |
| 1-2. Estructura de supertrama del protocolo MAC IEEE 802.15.4. | 16 |
| 1-3. Estructura de supertrama del protocolo IEEE 802.15.4. Período activo con CAP y CFP. | 17 |
| 1-4. Relación de SD y BI con la estructura de supertrama del protocolo IEEE 802.15.4. | 18 |
| 2-1. Estructura del módulo compuesto standardHost en OMNeT++. | 24 |
| 2-2. Estructura básica del simulador Castalia. | 25 |
| 2-3. Estructura básica del módulo compuesto de Nodo en Castalia. | 25 |
| 3-1. Escenario 1: Paquetes transmitidos promedio por nodo a nivel de Radio (a) y recibidos a nivel de Aplicación por cada nodo (b). | 36 |
| 3-2. Escenario 1: Comportamiento de la red a nivel de Radio. | 36 |
| 3-3. Escenario 1: Comportamiento de la red a nivel MAC. | 37 |
| 3-4. Escenario 1: Latencia promedio de los paquetes. | 38 |
| 3-5. Escenario 1: Consumo de energía promedio de cada nodo. | 38 |
| 3-6. Escenario 2: Paquetes transmitidos promedio por nodo a nivel de Radio (a) y recibidos a nivel de Aplicación por cada nodo (b). | 39 |
| 3-7. Escenario 2: Comportamiento de la red a nivel de Radio. | 40 |
| 3-8. Escenario 2: Comportamiento de la red a nivel MAC. | 40 |
| 3-9. Escenario 2: Latencia promedio de los paquetes. | 41 |
| 3-10. Escenario 2: Consumo de energía promedio de cada nodo. | 41 |

| | |
|--|----|
| 3–11.Escenario 3: Paquetes transmitidos promedio por nodo a nivel de Radio (a) y recibidos a nivel de Aplicación por cada nodo (b). | 42 |
| 3–12.Escenario 3: Comportamiento de la red a nivel de Radio y a nivel MAC. . . | 43 |
| 3–13.Escenario 3: Consumo de energía promedio de cada nodo. | 43 |
| 3–14.Escenario 3: Latencia promedio de los paquetes. | 44 |
| 3–15.Escenario 4: Paquetes transmitidos promedio por nodo a nivel de Radio. . . | 45 |
| 3–16.Escenario 4: Paquetes recibidos promedio a nivel de aplicación por cada nodo. Escenario 4.2. | 45 |
| 3–17.Escenario 4: <i>Goodput</i> de la red a nivel MAC. | 45 |
| 3–18.Escenario 4: Desglose de transferencias en la red a nivel MAC. | 46 |
| 3–19.Escenario 4: Latencia promedio de los paquetes. | 47 |
| 3–20.Escenario 4: Consumo de energía promedio de cada nodo. | 47 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|------------------|--|
| <i>ACK</i> | Mensaje de confirmación de recepción de paquete. <i>Acknowledgment</i> |
| <i>BER</i> | Razón de error de bit (<i>Bit Error Rate</i>) |
| <i>CAP</i> | Período de acceso por contención (<i>Contention Access Period</i>) |
| <i>CCA</i> | Verificación de estado del canal (<i>Clear Channel Assessment</i>) |
| <i>CCC</i> | Canal de Control Común (<i>Common Control Channel</i>) |
| <i>CFP</i> | Período de acceso libre de contención (<i>Contention Free Period</i>) |
| <i>CH</i> | Salto de Canal (<i>Channel Hopping</i>) |
| <i>CPU</i> | Unidad central de procesamiento (<i>Central Processing Unit</i>) |
| <i>CSMA/CA</i> | Acceso múltiple por verificación de portadora con evitación de colisiones (<i>Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance</i>) |
| <i>FFD</i> | Dispositivo de funcionalidad completa (<i>Full-Function Device</i>) |
| <i>FSK</i> | Modulación por llaveo de frecuencia (<i>Frequency Shift Keying modulation</i>) |
| <i>GTS</i> | Ranura de tiempo garantizada (<i>Guaranteed Time Slot</i>) |
| <i>LR – WPAN</i> | Red inalámbrica de área personal con bajas tasas de transmisión (<i>Low-Rate Wireless Personal Area Network</i>) |
| <i>MAC</i> | Control de acceso al medio (<i>Medium Access Control</i>) |
| <i>PAN</i> | Red de área personal (<i>Personal Area Network</i>) |
| <i>PSK</i> | Modulación por llaveo de fase (<i>Phase Shift Keying modulation</i>) |
| <i>RDC</i> | Ciclo útil de radio (<i>Radio Duty Cycling</i>) |
| <i>RFD</i> | Dispositivo de funcionalidad reducida (<i>Reduced-Function Device</i>) |
| <i>RSSI</i> | Indicación de intensidad de señal recibida (<i>Received Signal Strength Indication</i>) |
| <i>RTS/CTS</i> | Solicitud de envío/Aprobación de envío (<i>Request to Send/Clear to Send</i>) |
| <i>SINR</i> | Razón de señal a interferencia y ruido (<i>Signal to Noise-Interference Ratio</i>) |
| <i>SNR</i> | Razón de señal a ruido (<i>Signal to Noise Ratio</i>) |
| <i>SP</i> | Fase dividida (<i>Split Phase</i>) |
| <i>TCP/IP</i> | Stack de protocolos de comunicación para Internet |
| <i>WLAN</i> | Red inalámbrica de área local (<i>Wireless Local Area Network</i>) |
| <i>WPAN</i> | Red inalámbrica de área personal (<i>Wireless Personal Area Network</i>) |
| <i>WSN</i> | Red de sensores inalámbricos (<i>Wireless Sensor Network</i>) |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|---------------|---|
| BI | Intervalo de Guía, calculado según la ecuación 2.2 |
| D_N | Densidad de nodos de la WSN |
| η | Exponente de pérdidas del trayecto |
| $PL(d)$ | Pérdidas del trayecto para una distancia d |
| $PL(d_0)$ | Pérdidas del trayecto para una distancia de referencia d_0 |
| R_p | Tasa de generación de paquetes por nodo de la WSN |
| RDC | Ciclo útil de radio |
| R_I | Tasa de generación de paquetes por nodo de la red interferente |
| σ | Desviación estándar de X_σ |
| σ_{bd} | Desviación estándar de una variable aleatoria gaussiana de media cero encargada de diferenciar los dos enlaces individuales que conforman cada enlace bidireccional |
| S_I | Tamaño de la carga útil de cada paquete enviados por los nodos de la red interferente |
| X_σ | Variable aleatoria gaussiana de media cero con desviación estándar igual a σ |

INTRODUCCIÓN

Las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN, por sus siglas en inglés) son redes cuyos nodos colectan información del medio circundante y transmiten la información obtenida a través del espectro radioeléctrico. Las WSN tienen numerosas aplicaciones potenciales entre las que se incluyen la agricultura de precisión, sistemas de detección de intrusos, monitoreo de salud y otros escenarios de aplicación relevantes tanto para la industria como para la sociedad en general[1]. Estas aplicaciones requieren que los nodos operen de manera autónoma durante largos períodos de tiempo alimentados por baterías o algún otro medio de obtención de energía, lo cual implica que el requerimiento principal en el diseño de protocolos para estas redes es la eficiencia energética de los nodos. Además, dichas aplicaciones exigen otros requerimientos en cuanto a tasa de transferencia de datos (expresada generalmente en kilobits por segundo, Kbps), latencia y fiabilidad, que resultan difíciles de suplir con los recursos disponibles.

Puesto que la interfaz de radio es el componente que más energía consume dentro de un dispositivo de WSN, se puede alcanzar un ahorro de energía significativo en la capa de enlace a través del empleo de protocolos de Control de Acceso al Medio (MAC, por sus siglas en inglés) que manejen la interfaz de radio de manera eficiente. En este sentido, las WSN basan el control de la interfaz de radio en una técnica de ahorro de energía denominada Ciclo Útil de Radio (RDC, por las siglas en inglés de *Radio Duty Cycle*), la cual consiste en mantener la interfaz de radio apagada la mayor parte del tiempo y encenderla por períodos cortos en los cuales puede ocurrir la comunicación. Los protocolos MAC existentes para redes inalámbricas generales y redes *ad hoc* móviles no son aplicables a las WSN debido a que, en su mayoría, asumen la existencia de radios con múltiples transceptores o mantienen la interfaz de radio encendida la mayor parte del tiempo, además de estar diseñados para ancho de banda y potencia mayores que los disponibles en los dispositivos para WSN. Esto ha provocado que se hayan propuesto numerosos protocolos MAC para WSN[17].

Aunque el número de protocolos MAC propuestos para WSN es considerable, los estándares para este tipo de redes apenas han comenzado a ser conformados en los últimos años. La IEEE ha propuesto el estándar 802.15.4[16] para las capas física y MAC de la arquitectura de las redes inalámbricas de área personal de baja potencia (LR-WPAN, por sus siglas en inglés), categoría dentro de la cual se incluyen las WSN. Este estándar ha sido sometido a varios estudios de desempeño como por ejemplo los realizados en [16, 23, 24, 30].

Estos estudios han estado enfocados en determinadas características del protocolo, como por ejemplo su desempeño en redes a gran escala y de alta densidad, el comportamiento del esquema CSMA/CA empleado en el protocolo y otros. Las contribuciones de estos autores son de alto valor para aumentar el conocimiento alrededor de este estándar.

Uno de los principales obstáculos que deben superar las WSN es el efecto de la interferencia en el desempeño de los protocolos que manejan la red. Según el estándar 802.15.4, las WSN operan generalmente en la banda de $2,4\text{ GHz}$, la que a su vez es utilizada por varios sistemas con abundante presencia en los escenarios de despliegue de las WSN como son, por ejemplo, las redes IEEE 802.11 y los dispositivos Bluetooth. La mayoría de los sistemas que emplean la banda de $2,4\text{ GHz}$ están conformados por dispositivos que transmiten con más potencia y cuyos patrones de radiación no suelen ser direccionales, por lo que tienen un efecto considerable en redes de baja potencia como las WSN. Por esta razón, es de primordial importancia someter los protocolos para WSN a pruebas de desempeño bajo diferentes niveles de interferencia.

Por lo antes expuesto, surge como **problema científico** para los autores de esta investigación la necesidad de analizar el desempeño del protocolo MAC IEEE 802.15.4 bajo diferentes condiciones de carga de tráfico e interferencia. De este problema científico se desprende que el **objeto de investigación** son los protocolos MAC para WSN, siendo el **campo de acción** de la investigación la modelación, simulación y experimentación de protocolos MAC para WSN.

Para responder a la interrogante planteada, se define como **objetivo general** de la investigación realizar un análisis de desempeño del protocolo definido en el estándar IEEE 802.15.4 a través de simulaciones en Castalia/OMNeT++ [5, 45]. Para alcanzar este objetivo general, se proponen los siguientes **objetivos específicos**:

1. Sintetizar las características principales de la capa MAC de las WSN y los requerimientos principales de desempeño en esta capa.
2. Caracterizar el estándar IEEE 802.15.4 con énfasis en el protocolo MAC propuesto por el mismo.
3. Diseñar experimentos que permitan analizar el desempeño del protocolo MAC IEEE 802.15.4 bajo diferentes condiciones de tráfico y niveles de interferencia.
4. Describir el desempeño del protocolo MAC IEEE 802.15.4 a partir de los resultados de los experimentos realizados.

Estos objetivos específicos están destinados a dar respuesta a las preguntas científicas siguientes:

1. ¿Cuáles son las características fundamentales de la capa MAC en las WSN y sus principales requerimientos de desempeño?

2. ¿Cuáles son las características fundamentales del protocolo MAC para WSN propuesto en el estándar IEEE 802.15.4?
3. ¿Qué diseño experimental se puede utilizar para estudiar el desempeño del protocolo MAC IEEE 802.15.4 bajo diferentes condiciones de tráfico y niveles de interferencia?
4. ¿Cuál es el desempeño del protocolo MAC IEEE 802.15.4 según los resultados de los experimentos realizados?

La novedad científica de esta investigación radica en la realización de un análisis de desempeño de un estándar para la capa MAC de WSN propuesto recientemente por la IEEE. Este análisis constituye un aporte considerable puesto que el estándar IEEE 802.15.4 ha sido poco estudiado en nuestro país, donde las WSN constituyen una oportunidad de desarrollo de los sectores estratégicos de la economía y la sociedad. La presente investigación puede servir de base para futuros estudios en el tema o, incluso, para realizar mejoras a las versiones futuras del protocolo.

Para el desarrollo de esta investigación se escoge como simulador de redes el Castalia, diseñado específicamente para simulación de WSN sobre la plataforma de simulación OMNeT++. El empleo de simulación para la realización del análisis constituye una solución viable, práctica y de bajo costo para nuestra investigación puesto que los dispositivos de WSN disponibles en el mercado todavía tienen un costo considerable lo cual dificulta su adquisición por parte de los autores de esta investigación. Por otro lado, la simulación ha demostrado ser una herramienta vital para el proceso de investigación permitiendo reducir los costos de la misma sin hacer grandes sacrificios en cuanto a la validez y veracidad de sus resultados. Los criterios seguidos en la selección del simulador Castalia/OMNeT++ son explicados en la sección 2.1.

Los resultados alcanzados en la presente investigación son la realización de un estudio de desempeño del protocolo MAC propuesto en el estándar IEEE 802.15.4 basado en simulación, que permite esclarecer cuestiones relacionadas con el efecto que tiene la carga de tráfico y la interferencia en el desempeño del protocolo.

El informe está formado por la introducción, el desarrollo organizado en tres capítulos, las conclusiones, seguido de las recomendaciones relativas a investigaciones futuras, y finalmente, las referencias bibliográficas y anexos.

Capítulo 1: Se realiza una descripción general de las WSN a partir de sus características propias y en oposición a otras redes similares. Se caracteriza la capa MAC de las WSN, incluyendo los principales retos en el diseño de protocolos para esta capa y las principales tendencias de diseño de los mismos. Finalmente, se sintetiza el contenido del estándar IEEE 802.15.4 con énfasis en el protocolo MAC para WSN propuesto en el estándar.

Capítulo 2: Se fundamenta la selección del Castalia/OMNeT++ como simulador de WSN en oposición a otros simuladores como OPNET, NS y Qualnet. Se describe el modelo de simulación empleado en la investigación a partir de la configuración de los diferentes módulos del Castalia incluidos en el mismo. Por último, se realiza una descripción detallada de cada uno de los escenarios de simulación diseñados para la presente investigación.

Capítulo 3: Los resultados de la simulación de los escenarios descritos en el capítulo anterior son presentados y discutidos en el capítulo final. En la discusión de los resultados se presentan las conclusiones sobre el desempeño del protocolo MAC IEEE 802.15.4 extraídas de cada uno de los escenarios.

CAPÍTULO 1

CARACTERÍSTICAS DE LA CAPA MAC EN WSN

En el presente capítulo se describen las características fundamentales de la capa MAC en las WSN. Para ello en la sección 1.1 se caracterizan las WSN y sus diferencias fundamentales con las redes inalámbricas en general, particularmente con las redes *ad hoc* inalámbricas, así como los patrones de tráfico presentes en las WSN. A continuación, en la sección 1.2, se sintetizan las características específicas de la capa MAC en las WSN y las principales tendencias en el diseño de protocolos MAC para dichas redes. En la sección 1.3, se realiza una caracterización del estándar IEEE 802.15.4. Finalmente, la sección 1.4 resume algunas consideraciones finales del capítulo.

1.1. Características de las WSN

Recientes avances tecnológicos en la fabricación de dispositivos electrónicos han hecho posible que la idea del “Polvo Inteligente” planteada por Kahn et. al. en [21] se haga realidad a través de la combinación de sensores, un microcontrolador y una interfaz de radio en un mismo dispositivo. Estos dispositivos son capaces de recolectar información sobre el medio circundante a través de sus sensores, procesar esa información y transmitirla a través del medio inalámbrico. Con la interconexión de muchos dispositivos con estas características se constituye una WSN. A partir de lo anteriormente expuesto se puede definir una WSN como una red compuesta por un grupo de pequeños dispositivos que colectan información del medio que los circunda a través de sensores y transmiten esa información usando como medio de comunicación el medio inalámbrico compartido, con capacidad para realizar procesamiento sobre esa información. Estos dispositivos normalmente usan baterías como fuente de energía, y en ocasiones pueden incluir otros medios de obtención de energía (véase [13]).

Las aplicaciones de las WSN cubren un extenso rango que incluye agricultura de precisión, detección de intrusos, monitoreo de salud, monitoreo medioambiental y de la vida salvaje, rastreo de objetos, monitoreo y control de sistemas de climatización, por solo mencionar algunas. Estas aplicaciones comparten un conjunto de características y limitaciones que definen el área de investigación sobre las WSN. Primeramente, los nodos que componen

las WSN deben operar de manera autónoma por meses, o incluso años, para que las aplicaciones sean económicamente viables. Esto implica restricciones considerables en cuanto al consumo de energía puesto que estos nodos generalmente son alimentados por baterías y el cambio frecuente de las mismas no es una opción factible. Además, estas redes deben ser resistentes a errores de cualquier naturaleza, como por ejemplo:

- Los nodos pueden apagarse definitivamente debido al agotamiento de sus baterías.
- Los enlaces de comunicaciones entre nodos suelen ser inestables, de baja potencia y, en algunos casos, estar afectados por interferencias externas.
- Los sensores disponibles en los nodos suelen ser de bajo costo y, por tanto, son susceptibles a errores en su funcionamiento y proporcionar lecturas erróneas.

Otra característica común a las aplicaciones de las WSN es el hecho de que la información, ya sea generada periódicamente o disparada por un evento externo, debe ser enviada hacia un nodo sumidero o pasarela en el cual se procesa y, opcionalmente, se genera una respuesta apropiada. Debido a la poca potencia disponible para la interfaz de radio de los nodos, en la mayoría de las ocasiones este nodo sumidero no se encuentra en la cobertura del nodo que realiza la medición y, por tanto, la información debe llegar al sumidero realizando saltos de un nodo a otro[25].

Las WSN son similares a las redes *ad hoc* inalámbricas en muchos aspectos pero hay dos características que las diferencian notablemente. Primero, la necesidad de operar eficientemente desde el punto de vista energético limita notablemente las capacidades y recursos con los que se cuenta en cada uno de los nodos que integran la red. Los recursos de hardware de un dispositivo para WSN son escasos en tanto los microcontroladores empleados son de 8 o 16 bits, la capacidad de memoria está en el orden de los kilobytes y disponen de dispositivos de radio de baja potencia con tasas de transmisión de hasta 250 *Kbps*[25].

La segunda diferencia fundamental entre las WSN y las redes *ad hoc* móviles radica en el hecho de que los escenarios de despliegue de las WSN condicionan la comunicación entre los nodos. Específicamente, la comunicación entre dos nodos arbitrarios de la red no es posible en las WSN pues la potencia de los dispositivos y las distancias que los separan hacen que la transmisión tenga que realizarse por saltos a través de nodos intermedios ubicados entre los nodos que se desean comunicar. Además, las limitaciones de los dispositivos en cuanto a potencia provocan que los enlaces en WSN tiendan a ser inestables, por lo que la red debe ser resistente a errores de esta naturaleza. Las WSN trabajan en la banda de 2,4 *GHz*, por lo que sufren interferencia proveniente de otros sistemas operando en esa misma banda tales como redes IEEE 802.11 y Bluetooth, lo cual añade otra causa de inestabilidad en los enlaces[16]. El efecto que tienen en el desempeño de un protocolo las variaciones en la carga de tráfico así como la respuesta del mismo a diferentes niveles de interferencia determina su aplicabilidad en el campo de las WSN.

1.1.1. Disponibilidad de recursos en los nodos WSN

Las capacidades de los nodos para WSN varían notablemente entre las plataformas desarrollados en las últimas dos décadas. Siguiendo la tendencia ascendente en el desarrollo de la tecnología de fabricación de hardware, han aumentado la velocidad de los microcontroladores, los recursos de memoria de los que estos disponen y las tasas de transmisión posibles para sus interfaces de radio. Sin embargo, el consumo de energía de estos sistemas se mantiene relativamente inamovible. El resultado de esta tendencia es que se logran mayores capacidades de procesamiento y transmisión de datos con el mismo consumo de energía. Por esta razón, el tiempo de operación de un nodo sin cambio de baterías depende, en última instancia, del tiempo que el nodo permanezca en modo inactivo¹. Por ejemplo, un nodo operando con la interfaz de radio encendida todo el tiempo agota un par de baterías AA (3000mAh) en alrededor de 100 horas.

La tabla 1–1 muestra las especificaciones de varias plataformas de WSN disponibles actualmente en el mercado. Las cuestiones más importantes sobre los recursos disponibles en los nodos son las siguientes:

CPU: Los procesadores de 8 bits suelen ser comunes pero los de 16 bits están ganando popularidad, con frecuencias de reloj alrededor de los $10MHz$, con algunas excepciones como el dispositivo de gama alta *Imote2*[10]. La experiencia demuestra que esto es suficiente para ejecutar un protocolo MAC que controle un radio simple y todavía queda capacidad para realizar procesamiento a nivel de aplicación. Sin embargo, con radios que operan a nivel de paquete es posible ejecutar aplicaciones que demanden mayor capacidad. Uno de estos radios, el CC2420[43] de Texas Instruments, se ha convertido en el más común en las plataformas para WSN.

Memoria: La cantidad de memoria de programa disponible generalmente es suficiente para almacenar el código necesario para la operación del nodo. En el caso de memoria RAM ocurre lo contrario, obligando a los desarrolladores a minimizar el consumo de memoria del software.

Radio: Comparado con los estándares de WLAN, que tienen tasas de transferencia de $55Mbps$ o más, la tasa de transferencia máxima de los nodos de WSN ($250Kbps$) es notablemente baja. Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones de WSN consumen una pequeña fracción de esta tasa de transmisión. Lo más importante en cuanto a la interfaz de radio es el corto alcance (decenas de metros) y la baja calidad del enlace. Otra cuestión importante en cuanto al radio es el tiempo necesario para conmutar entre

¹Con “modo inactivo” o “estado inactivo” nos referimos al estado en el cual la interfaz de radio y el microprocesador del nodo permanecen apagados. A este estado se le denomina en la literatura sobre el tema *sleep mode*

el modo inactivo y el modo transmisión/recepción. Este tiempo no es despreciable y durante la conmutación se está consumiendo energía sin realizar transferencia de información. Por esta razón, pasar al estado de inactividad implica ahorro de energía solo si esto se realiza por largos períodos de tiempo, lo cual a su vez tiene un impacto significativo en la latencia de la red.

Tabla 1–1: Plataformas para WSN.

| | Mica2 [8] | MicaZ [9] | TmoteSky [31] | Imote2 |
|---------------|--|--|--|--|
| CPU | ATmega128L 8-bit, 8MHz 8mA, active 1 μ A, sleep | ATmega128L 8-bit, 8MHz 8mA, active 1 μ A, sleep | MPS430 16-bit, 8MHz 1.8mA, active 5.1 μ A, sleep | Intel PXA271 32-bit, 13-416MHz 31mA, active 390 μ A, sleep |
| Memory | 4KB RAM 128KB Flash | 4KB RAM 128KB Flash | 10KB RAM 48KB Flash | 256KB RAM 32MB Flash |
| Radio | CC1000 [42] 76Kbps 27mA, Tx 10mA, Rx 1 μ A, sleep | CC2420 250Kbps 17.4mA, Tx 18.8mA, Rx 1 μ A, sleep | CC2420 250Kbps 17.4mA, Tx 18.8mA, Rx 1 μ A, sleep | CC2420 250Kbps 17.4mA, Tx 18.8mA, Rx 1 μ A, sleep |

Las limitaciones impuestas por la necesidad de bajo consumo de energía y los recursos disponibles en los nodos restringen los tipos de aplicaciones soportadas por las WSN. Esto se refleja notablemente en el tráfico generado por la mayoría de las aplicaciones de WSN, el cual está limitado a unos pocos patrones de comunicación, que son detallados en la próxima sección.

1.1.2. Patrones de tráfico en WSN

Las aplicaciones de las WSN se dividen en dos clases: reporte periódico y monitoreo basado en eventos. La clase de reporte periódico agrupa aquellas aplicaciones donde la información se genera regularmente en los nodos y debe ser transmitida hacia el sumidero para procesamiento posterior. Un ejemplo típico de estas aplicaciones es la agricultura de precisión, donde parámetros tales como temperatura y humedad son monitoreados constantemente. El monitoreo basado en eventos agrupa las aplicaciones donde se supervisa la ocurrencia de determinados eventos. En la mayoría de las aplicaciones de este tipo, los eventos monitoreados ocurren con poca frecuencia y, por tanto, la red tiene baja carga de tráfico la mayor parte del tiempo excepto cuando la ocurrencia de un evento genera ráfagas de tráfico en dirección al sumidero. Ejemplos de monitoreo basado en eventos son los sistemas de detección de intrusos y las alarmas contra incendio[25].

Independientemente del tipo de aplicación, el tráfico generado en las WSN se reduce a tres patrones de tráfico básicos conocidos como *flooding*, *convergecast* y *local-gossip*. Estos patrones de tráfico consisten en:

Flooding: Una de las tareas del nodo sumidero es controlar la operación de la red de sensores. Para ello, el nodo sumidero necesita comunicar información a todos los nodos, por ejemplo para cambiar un parámetro de aplicación o para actualizar el programa que se ejecuta en los nodos. Este tráfico ha sido denominado *flooding*, en lugar de difusión, pues en el área de WSN la difusión de un mensaje generalmente tiene un alcance limitado a los nodos vecinos del que emite el mensaje. En principio, una inundación, o *flooding*, de la red es iniciada por un nodo sumidero que difunde un mensaje a todos sus vecinos y éstos, a su vez, lo vuelven a difundir. Aunque a este proceso se le incorporan generalmente mecanismos para evitar lo que se conoce como *tormenta de difusión*, este es el principio básico del *flooding*.

Convergecast: En general, los sensores reportan sus mediciones, ya sea periódicamente o disparadas por un evento, hacia un nodo sumidero siguiendo un *spanning tree*. Una consecuencia importante de este patrón de tráfico es que los nodos que se encuentran más cercanos al sumidero por lo general manejan más mensajes que el resto, con el consumo de recursos que esto implica. Por esta razón, los protocolos MAC para WSN deben estar preparados para manejar más tráfico a medida que disminuye la distancia lógica entre los nodos y el sumidero.

Local-gossip: En ocasiones los nodos necesitan intercambiar información con sus vecinos con fines de pre-procesamiento o control de protocolos de capas superiores, sin que esta información vaya dirigida al sumidero. Por ejemplo, compartir información sobre las mediciones efectuadas entre vecinos podría permitir el filtrado de falsas alarmas causadas por mediciones defectuosas u obtener información adicional como la velocidad y dirección de un objetivo en movimiento. En dependencia de la situación los nodos pueden comunicarse par-a-par o colectivamente. Aunque la difusión puede parecer atractiva desde el punto de vista del emisor, ésta no es fácil de implementar a nivel MAC sin altos consumos de energía.

En el caso de las aplicaciones de reporte periódico, el patrón de tráfico dominante es el *convergecast*, mientras que en las de monitoreo basado en eventos el responsable de la mayor parte del consumo de recursos es el intercambio cercano de mensajes para verificar el estado de los nodos dentro de la red. En ambos casos el *flooding* se usa con poca frecuencia, aunque puede proporcionar una vía para recuperarse de fallas.

1.2. Características de la capa MAC en WSN

La búsqueda de eficiencia energética es el rasgo fundamental que define la investigación relacionada con las WSN. Este aspecto cobra mayor importancia en la capa MAC por ser la encargada de controlar el componente mayor consumidor de energía de un nodo WSN: la interfaz de radio. Además, la escasez de recursos disponibles en los nodos obliga al desarrollo de soluciones que requieran niveles de procesamiento mínimos y con bajo uso de memoria. Estas consideraciones limitan notablemente el espacio de diseño para la capa

MAC de WSN. En esta sección se exploran las causas fundamentales de consumo adicional de recursos introducidas por los protocolos así como las principales tendencias de diseño de protocolos MAC para WSN.

1.2.1. Fuentes de consumo adicional de recursos

Para demostrar las posibles causas de consumo adicional de recursos introducidas por el protocolo MAC en WSN, el investigador K. Langendoen propone en [25] utilizar el protocolo IEEE 802.11 (CSMA/CA) como ejemplo para explorar su comportamiento en WSN. A partir de este análisis, se pueden describir las siguientes causas de consumo adicional de recursos en los nodos:

Escucha inactiva: En la mayoría de las aplicaciones de WSN se necesita solamente una fracción del ancho de banda disponible. Sin embargo, un protocolo MAC no puede determinar cuándo se enviará un mensaje a menos que tenga disponible alguna información adicional. Por tanto, el radio debe permanecer encendido todo el tiempo para evitar que se pierdan mensajes dirigidos al nodo. Esta escucha inactiva es la mayor causa de desperdicio de energía puesto que los radios consumen más energía cuando están recibiendo que cuando están en modo inactivo. La solución para este problema ha sido utilizar RDC y concentrar las comunicaciones en los períodos activos de los nodos, lo cual es difícil de lograr de manera eficiente.

Sobre-escucha: Otra consecuencia de permanecer todo el tiempo escuchando el canal en espera de tráfico es que en repetidas ocasiones un nodo recibirá mensajes que no están destinados a éste sino a alguno de sus vecinos. La recepción de estos mensajes es un desperdicio de energía y el problema se agrava a medida que aumenta la densidad de la red.

Colisiones: Aunque los nodos empleen períodos de retiro aleatorios dentro de la ventana de contención por el canal, todavía pueden ocurrir colisiones debido al tiempo transcurrido entre la verificación del estado del canal y la transferencia de datos. Además, el empleo de mensajes RTS/CTS es prohibitivo para las WSN donde la carga de los paquetes está en el orden de las decenas de bytes y, por tanto, no amortizan la inversión de transmitir los mensajes RTS/CTS. Este problema también se agrava a medida que crece la densidad de nodos en la red pues aumentan los niveles de contención por el acceso al medio. La solución empleada usualmente para las colisiones es la retransmisión del mensaje pero esta técnica tiende a aumentar el número de colisiones cuando el tráfico adicional comienza a provocar más colisiones.

Fluctuaciones de tráfico: En las redes WSN el tráfico fluctúa no solo en función del tiempo sino, además, en función de la posición que ocupan los nodos en la red puesto que los nodos más cercanos al sumidero usualmente tienen que manejar volúmenes de tráfico mayores que aquellos que se encuentran en los bordes de la red. Ambas formas de fluctuación en el tráfico introducen un problema difícil de solucionar a nivel

MAC pues pueden provocar congestión en la red cuando la carga de tráfico es alta, o desperdicio de recursos durante los momentos en que la carga de tráfico es baja. En cualquiera de estos casos, el consumo de energía aumenta a niveles insostenibles para la red.

Control del protocolo: Las cabeceras MAC y los mensajes de control necesarios para la operación del protocolo se consideran consumo adicional de recursos puesto que no contienen información de la aplicación para la que está destinada la red. Este problema es mucho más grave en las WSN, donde la carga útil de los paquetes es pequeña y el consumo por cabeceras de protocolo y mensajes de control se hace difícil de amortizar. Por esta razón, los protocolos MAC para WSN deben reducir en todo lo posible el intercambio de información de control entre nodos.

Estas fuentes de consumo adicional de recursos son comunes a la mayoría de los protocolos basados en contención, aunque el peso de cada una de ellas varía de un protocolo a otro. La alternativa de emplear un acercamiento de acceso múltiple por división en el tiempo (TDMA, por sus siglas en inglés) resulta atractiva pues la escucha inactiva, la sobreescucha, y las colisiones no ocurren en protocolos que usan esta técnica. Sin embargo, los protocolos basados en TDMA suelen reducir la flexibilidad y adaptabilidad de la red, lo que conlleva a reservar más recursos de los necesarios (sobre-aprovisionamiento), mayor consumo asociado al protocolo en cabeceras y mensajes de control, y aumento considerable de la complejidad del protocolo.

En el siguiente epígrafe, se resumen las tendencias fundamentales de diseño de protocolos MAC para WSN. Se describen también los principales mecanismos empleados por los diferentes protocolos con el fin de reducir el consumo adicional de recursos a la vez que se intenta aumentar el desempeño de la red en cuanto a tasa de transferencia de datos, aprovechamiento del ancho de banda, latencia y, principalmente, eficiencia energética.

1.2.2. Principales tendencias de diseño de protocolos MAC para WSN

Para explorar las tendencias de diseño de protocolos MAC para WSN seguiremos la taxonomía propuesta por Huang et. al. en [17]. En dicho trabajo, se propone dividir los protocolos MAC para WSN según la línea de investigación asociada, obteniéndose así cuatro ramas principales de protocolos: asíncronos, síncronos, de tiempo ranurado y multicanal. Esta clasificación permite esclarecer los principales retos y ventajas de cada uno de los acercamientos seguidos hasta ahora para el diseño de protocolos MAC para WSN. Debido al considerable número de protocolos MAC para WSN propuestos hasta la fecha, no todos son mencionados en este informe sino solamente aquellos protocolos representativos de cada una de las clasificaciones seguidas por los autores.

Protocolos Asíncronos

Un protocolo se considera asíncrono cuando los nodos programan su RDC de manera autónoma, sin información adicional obtenida de la red. Estos protocolos pueden alcanzar valores de RDC muy bajos pero necesitan encontrar una manera eficiente de establecer comunicación entre los nodos. En las WSN los nodos pasan la mayor parte del tiempo en modo inactivo y se despiertan periódicamente para verificar si son destinatarios de algún paquete. En su forma más básica, los nodos de un protocolo MAC asíncrono se despiertan periódicamente y verifican el estado del canal. Si el canal está desocupado, entonces vuelven al modo inactivo inmediatamente. En caso de que el canal esté ocupado, los nodos permanecen activos escuchando el preámbulo hasta recibir los datos o que expire un temporizador indicando que los datos han tardado demasiado. Esto trae como consecuencia que los nodos no implicados en la comunicación escuchen todo el preámbulo y luego pasen a inactividad, lo cual consume energía innecesariamente en dichos nodos.

Varias modificaciones a este mecanismo básico han sido propuestas. Las más relevantes son la Escucha de Baja Potencia(LPL, por sus siglas en inglés), propuesta en [33]; el Chequeo de Baja Potencia (LPP, por sus siglas en inglés)[2, 3, 27, 49], y el aprendizaje de la programación de los nodos[20, 26, 28, 41]. Otros protocolos han trasladado el inicio de la comunicación hacia el receptor[20, 26, 28, 41], reduciendo así la escucha inactiva y la sobreescucha pero, a cambio, deben incluir algún mecanismo para resolver los conflictos cuando dos o más emisores desean comunicarse con el mismo receptor en un momento dado. Los protocolos asíncronos tienen como ventaja que el tiempo de verificación del canal es corto y por tanto se puede realizar con mayor frecuencia, permitiendo alcanzar bajo RDC. Sus desventajas fundamentales son alta latencia dentro de la red y baja utilización del ancho de banda.

Protocolos Síncronos

Una solución natural para establecer comunicación entre los nodos es sincronizar el período activo de los nodos vecinos usando algún mecanismo de sincronización. En los protocolos MAC síncronos, un nodo escucha el canal por un determinado lapso de tiempo. Si en ese tiempo recibe la programación de algún otro nodo, entonces se sincroniza con éste y se convierte en un seguidor. Si el nodo no recibe programación alguna durante ese tiempo, entonces determina su propia programación y la difunde, lo cual hace que el nodo se convierta en un sincronizador. De esta forma los nodos van formando *clusters* de varios saltos. Como el período activo de la programación es común para todos los nodos dentro de un *cluster*, la contención entre los nodos determina cuál de ellos toma el control del canal.

Un protocolo síncrono clásico es S-MAC[52], el cual tiene la desventaja de que los paquetes solo pueden viajar un salto en cada período activo. Para alcanzar más de un salto en cada

período activo, se han empleado otras técnicas como, por ejemplo, el mecanismo de RTS futuro (FRTS, por sus siglas en inglés)[44], el cual ha sido modificado en [12, 40]; y las utilizadas por [29, 47] para escalonar los períodos activos de los nodos en dirección hacia o desde el sumidero.

Los protocolos MAC síncronos no enfrentan el problema del establecimiento de la comunicación entre los nodos, como sí lo hacen los protocolos asíncronos. Por tanto, la mayoría de los diseños se enfocan en mejorar el *throughput* y reducir la latencia. Estos protocolos son más apropiados para aplicaciones de tráfico periódico donde la programación para la activación de los nodos es fácil de determinar.

Protocolos de tiempo ranurado

Los esquemas de tiempo ranurado se derivan de TDMA. La ventaja principal de TDMA es que brinda un *throughput* alto con máxima utilización del canal cuando hay altos niveles de contención. Aunque TDMA requiere sincronización global, la adopción de esquemas de tiempo ranurado no introduce consumo adicional de recursos en aplicaciones que requieren sincronización con el fin de proporcionar correlación espacio-temporal entre los reportes generados por los sensores. Por tanto, los protocolos MAC de tiempo de ranurado serían candidatos prometedores para este tipo de aplicaciones. Estos protocolos son populares además en redes de pequeña escala, como por ejemplo las redes inalámbricas de área personal (WPAN, por sus siglas en inglés).

Una de las mayores desventajas de TDMA es su baja utilización del canal cuando existen pocos nodos enviando datos, lo cual es un escenario común en redes de sensores. Varias soluciones se han propuesto para tratar de atenuar el efecto de este problema sobre la red, como por ejemplo la introducción de CSMA dentro de TDMA propuesta en [14, 37], la asignación dinámica[7, 35], el reuso espacial de ranuras de tiempo[39], y el traslado del centro de la comunicación hacia el receptor[15, 54].

Las limitaciones de los mecanismos utilizados en protocolos MAC basados en ranuras de tiempo hacen que su empleo dependa fuertemente de la aplicación que se implemente. Los principales retos en el diseño de este tipo de protocolos son la resolución de las colisiones y la garantía de demoras determinísticas. Por otro lado, las ventajas inherentes al empleo de TDMA, como el acceso al medio libre de colisiones y la buena utilización del ancho de banda que se logra cuando la carga de tráfico es alta, hacen de estos protocolos candidatos de consideración para las aplicaciones de WSN.

Protocolos Multicanal

La mayoría de los protocolos MAC propuestos para WSN emplean una sola frecuencia para la comunicación[17]. Sin embargo, los dispositivos existentes para WSN en los últimos años ya están equipados con interfaces de radio con múltiples frecuencias, siendo la más popular de ellas el circuito integrado CC2420 de Texas Instruments. Por estas razones, desde el año

2006 se han propuesto varios protocolos MAC multicanal para WSN que han demostrado tener mejor rendimiento en la mayoría de las aplicaciones cuando se comparan con aquellos que emplean una sola frecuencia[17]. En el diseño de protocolos MAC multicanal se le debe dar respuesta a dos preguntas fundamentales: ¿cómo distribuir los canales? y ¿cómo establecer la comunicación entre diferentes canales? Las respuestas deben además tener en cuenta el costo y la eficiencia energética.

En cuanto a la asignación de canal, los protocolos MAC multicanal para redes inalámbricas incluyen representantes de las tres estrategias fundamentales: asignación fija, usada por TMCP[50]; asignación semi-dinámica, seguida por los protocolos [19, 55] y asignación dinámica. En cuanto a esta última categoría, existen tres formas de coordinar la asignación dinámica de canales[11], también conocida como *rendezvous*: canal de control común (CCC), empleada por [19, 22, 55]; fase dividida (SP, por sus siglas en inglés), utilizada en protocolos híbridos[19, 22] para brindar soporte a la difusión local, y salto de canal (CH, por sus siglas en inglés), de la cual un ejemplo notable es el protocolo MuChMAC[4]. Otro aspecto a considerar en la asignación de canales es el lugar lógico dentro de la red donde se realiza la asignación: de manera centralizada o distribuida. La primera variante es la menos utilizada pero existen algunos protocolos que la utilizan, como por ejemplo el TMCP; mientras que la segunda es la seguida por la mayoría de los protocolos pues requiere menos comunicación de control del protocolo.

Una consideración importante acerca de los protocolos MAC multicanal para WSN es el tiempo requerido para conmutar de un canal a otro y el consumo de energía asociado a este proceso. Estos protocolos tienen la ventaja de permitir transmisiones concurrentes, lo cual generalmente aumenta el *throughput* de la red a la vez que disminuye la latencia, manteniendo niveles de consumo de energía aceptables.

1.3. Estándar IEEE 802.15.4

Para finalizar el presente capítulo se realiza una síntesis del estándar IEEE 802.15.4[18], la cual no pretende mostrar todos los detalles del mismo sino solamente sus aspectos más relevantes para las WSN. El protocolo IEEE 802.15.4 define la capa física y la capa MAC para Redes Inalámbricas de Área Personal con Bajas Tasas de Trasmisión (LR-WPAN, por sus siglas en inglés). Según el mismo, los principales objetivos de una LR-WPAN son: facilidad de instalación, transferencia de datos confiable, costo extremadamente bajo, y duración de batería razonable, manteniendo los protocolos simples y flexibles.

En una red 802.15.4 pueden participar dos tipos de dispositivos: dispositivos de funcionalidad completa (FFD, por sus siglas en inglés) y dispositivos de funcionalidad reducida (RFD, por sus siglas en inglés). Un FFD es un dispositivo capaz de servir como coordinador de una red de área personal (PAN, por sus siglas en inglés) o como coordinador local. Un RFD es un dispositivo que no tiene esta capacidad y, por tanto, está orientado para

aplicaciones extremadamente simples y se asocia solamente con un FFD a la vez. Una WPAN consiste de dos o más dispositivos compatibles con el estándar comunicándose en el mismo canal físico, donde al menos uno de los dispositivos es un FFD que opera como coordinador de la PAN.

El estándar soporta dos topologías de red básicas: topología de estrella y topología par-a-par. En la topología de estrella, la comunicación se establece entre los dispositivos y un controlador central único, denominado coordinador PAN. Las funciones del coordinador PAN como controlador principal de la red son iniciar, terminar o enrutar las comunicaciones a través de la red. Frecuentemente el coordinador PAN tiene alimentación de la línea principal mientras que el resto de los dispositivos debe ser alimentado por baterías. Algunas aplicaciones que se benefician de la topología de estrella son: automatización de casas, periféricos de computadoras personales, juegos y monitoreo personal de salud.

La topología par-a-par también incluye un coordinador PAN pero con la diferencia de que en este caso cualquier par de dispositivos de la red puede comunicarse entre sí siempre y cuando estén dentro de su rango mutuo de comunicación. Algunas aplicaciones beneficiadas con la topología par-a-par son: control y monitoreo industrial, agricultura inteligente, y seguridad. Esta topología permite formaciones de red más complejas como, por ejemplo, la topología de malla o la de árbol de *clusters*. La topología par-a-par permite el empleo de múltiples saltos para enrutar los mensajes entre dos dispositivos cualquiera de la red.

Un dispositivo compatible con el estándar comprende, al menos, una capa física (identificada como PHY en la figura 1-1), la cual contiene el transceptor de radiofrecuencia (RF) junto a su mecanismo de control de bajo nivel; y una capa MAC que proporciona acceso al canal físico para todo tipo de transferencias. Las interfaces entre las capas definen los enlaces lógicos entre ellas, los cuales son descritos en el estándar. Tanto las capas superiores como las interfaces entre capas están fuera del alcance de la presente investigación. La figura 1-1 muestra un diagrama de la arquitectura de red descrita.

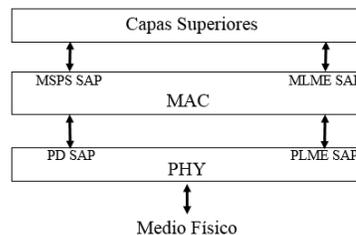


Figura 1-1: Arquitectura del estándar IEEE 802.15.4.

Las funciones de la capa física son: activación y desactivación del transceptor de radio, detección de energía, indicación de calidad del enlace (LQI, por sus siglas en inglés), selección del canal, verificación de actividad en el canal (CCA, por sus siglas en inglés), y transmisión/recepción de paquetes a través del medio físico.

1.3.1. Protocolo MAC del estándar IEEE 802.15.4

Según la versión del estándar IEEE 802.15.4 del año 2011[18], la capa MAC maneja todo el acceso al canal físico y es responsable de las siguientes tareas:

- Generación de Guías si el dispositivo es un coordinador.
- Sincronización de la red a través de Guías.
- Soporte para asociación y disociación de dispositivos a la red.
- Soporte de seguridad en los dispositivos.
- Empleo de mecanismo CSMA/CA para el acceso al canal.
- Administración del mecanismo de Ranuras de Tiempo Garantizadas (GTS, por sus siglas en inglés).
- Provisión de un enlace confiable entre dos entidades MAC homólogas.

El protocolo MAC IEEE 802.15.4 se basa en un diseño híbrido con dos modos de operación, uno de tiempo ranurado a través en el empleo de Guías, y otro asíncrono. El acceso al medio en redes que operan en modo asíncrono se realiza usando CSMA/CA no ranurado con la opción adicional de ACK de los mensajes. En las redes que emplean Guías, el acceso al medio se basa en una estructura de supertrama compuesta por una Guía, que da inicio a la supertrama; un período activo, donde se realiza la comunicación usando CSMA/CA ranurado con la opción adicional de incluir hasta 7 períodos de GTS; y, opcionalmente, un período inactivo durante el cual todos los nodos pueden permanecer en estado inactivo. Esta estructura de supertrama se muestra en la figura 1–2.

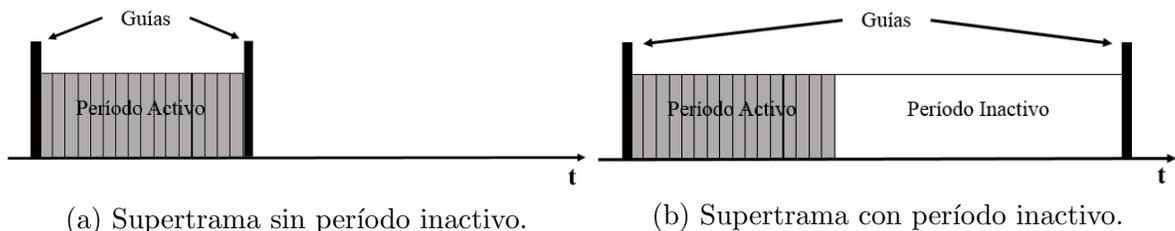


Figura 1–2: Estructura de supertrama del protocolo MAC IEEE 802.15.4.

El formato de la supertrama es definido por el coordinador. Cada supertrama se divide en 16 ranuras de tiempo de igual duración durante el período activo. Las 16 ranuras de tiempo pueden ser divididas por el coordinador en un período de acceso por contención (CAP, por sus siglas en inglés) y un período libre de contención (CFP, por sus siglas en inglés). Cualquier dispositivo que desee comunicarse durante el CAP entre dos Guías compite con otros dispositivos usando el mecanismo CSMA/CA ranurado. Para aplicaciones con requerimientos específicos de latencia o de ancho de banda, el coordinador puede dedicar porciones del período activo de la supertrama para esa aplicación. Estas porciones son las denominadas GTS, las cuales conforman el período libre de contención. Este período siempre aparece al final del período activo de la supertrama, inmediatamente después de terminado el CAP, tal y como se muestra en la figura 1–3. Un GTS puede ocupar más de una ranura de tiempo.

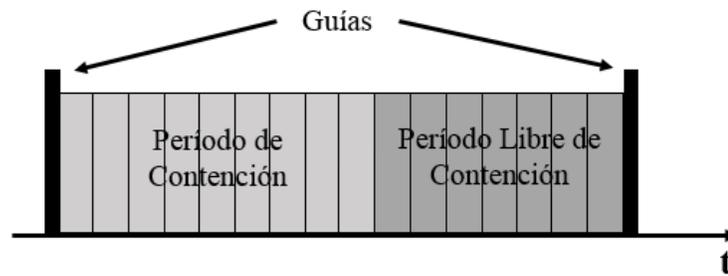


Figura 1–3: Estructura de supertrama del protocolo IEEE 802.15.4. Período activo con CAP y CFP.

La estructura de la supertrama está descrita por los valores de *macBeaconOrder* y *macSuperframeOrder*. El primero describe el intervalo usado por el coordinador para transmitir las Guías, BI, según la siguiente ecuación:

$$BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{macBeaconOrder} \quad (1.1)$$

para $0 \leq macBeaconOrder \leq 14$.

Si el valor de *macBeaconOrder* es 15, entonces el coordinador no debe transmitir Guías excepto cuando le sea requerido por alguno de los nodos de la red. El atributo *macSuperframeOrder* describe la longitud de la porción activa de la supertrama, incluyendo la Guía. El valor de este atributo está relacionado con la duración de la supertrama, SD, siguiendo la siguiente ecuación:

$$SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{macSuperframeOrder} \quad (1.2)$$

para valores tales que se cumpla $0 \leq macSuperframeOrder \leq macBeaconOrder \leq 14$.

La relación entre estos parámetros y su efecto en la estructura de supertrama se ilustran en la figura 1–4. Las redes que no deseen usar la estructura de supertrama, deben poner sus atributos *macBeaconOrder* y *macSuperframeOrder* al valor 15. En este caso, el coordinador no debe transmitir Guías y todas las transmisiones deben utilizar un mecanismo CSMA/CA no ranurado para acceder al canal, a excepción de las tramas ACK y cualquier trama de datos que siga inmediatamente a un ACK causado por un comando de solicitud de datos. Además, debe quedar prohibido el empleo de GTS.

Funcionamiento del protocolo IEEE 802.15.4

Descrita la estructura de supertrama utilizada por el estándar IEEE 802.15.4, a continuación se resume el funcionamiento del protocolo a partir del establecimiento de una red, la asociación de dispositivos a la red creada y el funcionamiento de la comunicación entre los nodos asociados.

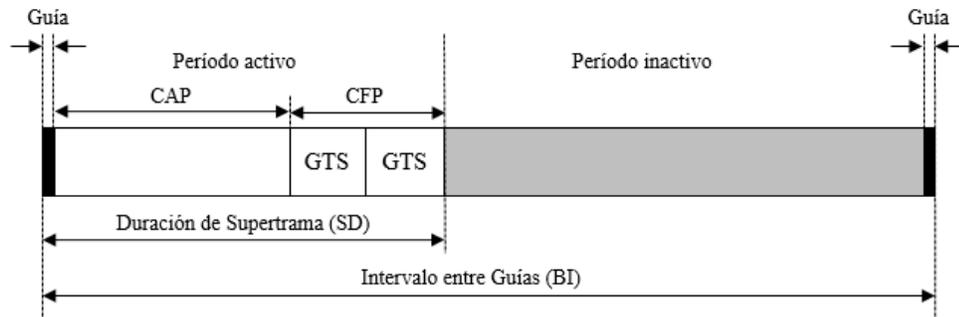


Figura 1–4: Relación de SD y BI con la estructura de supertrama del protocolo IEEE 802.15.4.

Una red IEEE 802.15.4 debe ser creada por un FFD solamente después de reiniciar la capa MAC, realizar una revisión activa de canal, y seleccionar un identificador de red válido. El algoritmo para la selección de un identificador de red a partir de la lista de descriptores devuelta por la revisión activa de canal está fuera del alcance del estándar. El último requerimiento para la creación de una red IEEE 802.15.4 es que el FFD que está realizándolo debe utilizar un valor menor que $0xFFFF$ como su dirección *macShortAddress*. Una vez realizado este proceso, si no existe conflicto en cuanto al coordinador de la red o una vez resuelto el mismo, el dispositivo que opera como coordinador global comienza a transmitir Guías con la información necesaria para que el resto de los dispositivos se puedan alinear con la supertrama de la red creada.

Un dispositivo que desee asociarse a una red debe reiniciar su capa MAC y realizar una revisión de canal, activa o pasiva. Con esa información se selecciona una de las redes IEEE 802.15.4 disponibles y el dispositivo solicita su asociación a esa red. Esta solicitud podrá ser aceptada o denegada por el coordinador global. Una vez que esta solicitud ha sido aceptada, el dispositivo comienza a escuchar las Guías del coordinador de la red escogida para configurar su capa MAC acorde a los parámetros transmitidos en dichas tramas y sincronizarse con el coordinador. Si la red no soporta Guías, la sincronización se realiza encuestando al coordinador por datos.

Para realizar el sincronismo en una red que utiliza Guías, un dispositivo debe habilitar su receptor durante un intervalo superior al intervalo entre guías, BI. Si en ese tiempo no se recibe una Guía válida (*i.e.* proveniente del coordinador de la red a la que está asociado el dispositivo), el dispositivo repetirá el procedimiento hasta alcanzar el máximo valor permitido para ello según su configuración. Si se recibe una Guía válida, entonces ya el dispositivo puede comenzar a comunicarse siguiendo la estructura de supertrama descrita en la Guía.

Debido a que el estándar favorece a dispositivos de muy bajo costo que, en general, están alimentados por baterías, las transacciones pueden ser iniciadas por los dispositivos en sí en vez de por el coordinador. Esto significa que hay dos formas de que un mensaje llegue

de un dispositivo a otro usando al coordinador de la red: el coordinador indica en su Guía cuando hay mensajes pendientes para un dispositivo, o los propios dispositivos encuestan al coordinador para saber si existen mensajes pendientes para ellos. Las transacciones que implican al coordinador se denominan en el estándar como transmisiones indirectas. El otro tipo de transacciones que admite el estándar son las realizadas directamente en comunicaciones par-a-par sin empleo del coordinador usando un mecanismo CSMA/CA no ranurado.

Las transmisiones indirectas comienzan por una solicitud de transmisión indirecta que se envía al coordinador, cuya información constituye una transacción que el coordinador debe ser capaz de almacenar. La transacción permanece en el coordinador hasta que el dispositivo destinatario de la misma la extrae a través de un mensaje ACK o hasta que expira el tiempo máximo de persistencia de transacciones. Para informar a los dispositivos que tienen una transacción pendiente, el coordinador incluye las direcciones de los dispositivos implicados en la transacción en el campo Lista de Direcciones e indica el número de direcciones en el campo Especificación de Direcciones Pendientes de la Guía. Si el coordinador puede almacenar más de 7 transacciones pendientes, éste las debe indicar en su Guía en base a su orden de arribo al coordinador.

Si existe una transacción pendiente que tiene como destinatario la dirección de difusión, el campo de Trama Pendiente debe ser puesto a cero, y el mensaje pendiente se transmite inmediatamente después de la Guía usando el algoritmo CSMA/CA. Solo se permite la transmisión de un mensaje de difusión por supertrama, aun cuando existan varios mensajes de difusión pendientes en la cola. Cuando un dispositivo recibe una Guía indicando que hay un mensaje de difusión pendiente, debe dejar su receptor habilitado por el tiempo especificado en el atributo *macMaxFrameTotalWaitTime* para recibir el mensaje de difusión.

Cuando un dispositivo encuentra su dirección en la Lista de Direcciones, éste solicita al coordinador la extracción de la transacción y éste último envía la transacción hacia el destinatario. Las interacciones de los dispositivos con el coordinador pueden incluir, opcionalmente, el envío de mensajes de ACK usando un mecanismo ALOHA para confirmar la recepción exitosa de los mensajes. En caso de no lograr una transmisión exitosa, se realiza la retransmisión de los mensajes por un número de intentos determinado por el atributo *macMaxFrameRetries*. Las comunicaciones que emplean GTS no usan CSMA/CA.

Un GTS permite a un dispositivo operar en un canal dentro de una porción de la supertrama dedicada exclusivamente a ese dispositivo. Los GTS solo pueden ser administrados por el coordinador y solo pueden ser utilizados para las comunicaciones entre el coordinador y los dispositivos asociados a dicha red. El coordinador puede reservar hasta 7 GTS a la vez, si existe suficiente capacidad dentro de la supertrama. Cada GTS debe ser liberado cuando ya no sea necesario, a decisión del coordinador o por solicitud del dispositivo que

inicialmente solicitó la reservación del GTS. Los dispositivos que tienen un GTS reservado pueden operar en el CAP igualmente. Un GTS puede ocupar más de una ranura de tiempo.

La descripción presentada aquí del protocolo MAC IEEE 802.15.4, sirve de base para su configuración en los escenarios de simulación empleados en la presente investigación y que son descritos en el siguiente capítulo.

1.4. Consideraciones finales

En el capítulo 1 de este informe de investigación se han abordado los temas que los autores consideran necesarios para establecer el marco teórico en el cual se desarrolla la presente investigación. Con este fin, se han descrito las características fundamentales de las WSN y sus diferencias con otras redes similares como, por ejemplo, las redes *ad hoc* inalámbricas, haciendo especial énfasis en los limitados recursos disponibles en los nodos y los patrones de tráfico específicos de este tipo de redes. A partir de ahí, se han descrito las características de la capa MAC en WSN, concluyendo con la necesidad de diseñar protocolos MAC específicos para WSN. Además, se ha incluido en este capítulo una síntesis de las principales tendencias de diseño en el área de los protocolos MAC para WSN, la cual resulta útil para ubicar el protocolo MAC IEEE 802.15.4 dentro del espacio de diseño definido.

Para finalizar el capítulo se ha realizado una descripción del estándar IEEE 802.15.4, con especial énfasis en el protocolo MAC propuesto en el mismo. A través de esta descripción, se puede constatar que las características de los dispositivos y las topologías de red definidas en el estándar favorecen su aplicación en el área de WSN por estar orientado a dispositivos de bajos recursos y soportar los patrones de tráfico más comunes en las WSN.

CAPÍTULO 2

PROTOCOLO MAC IEEE 802.15.4 EN CASTALIA/OMNET++

El presente capítulo se dedica a la modelación y simulación del protocolo MAC del estándar IEEE 802.15.4 en el simulador Castalia/OMNeT++. La sección 2.1 se dedica a fundamentar la utilización del OMNeT++ como plataforma de simulación y el simulador Castalia, a partir de sus características propias y en contraposición a otros simuladores para WSN. A partir de la selección de Castalia, en la sección 2.2 se define el modelo de simulación utilizado, explicando las decisiones tomadas en cada caso. En la sección 2.3 se describen los escenarios de simulación empleados en la presente investigación. Finalmente, se incluyen algunas consideraciones finales sobre los temas tratados en el capítulo.

2.1. Selección del simulador Castalia/OMNeT++

La simulación ha demostrado ser una herramienta casi indispensable para el desarrollo de investigaciones en el área tecnológica. La importancia del papel que juega la simulación en el proceso de investigación y desarrollo de protocolos de comunicación se hace más notable en el campo de las WSN en tanto las limitaciones de recursos de los nodos que las componen hacen necesarios niveles de optimización considerables.

El reciente auge de las investigaciones en el área de WSN ha traído consigo la creación de muchos simuladores para estas redes y la utilización y adaptación de simuladores ya existentes. Entre este gran número de simuladores disponibles para WSN existen algunas tendencias generales en las cuales se pueden agrupar. Por ejemplo, algunos simuladores están orientados a trabajar con una plataforma específica de WSN mientras otros mantienen un tratamiento general de la red y los dispositivos que la conforman con el fin de proporcionarle generalidad a los resultados obtenidos en los mismos. Los lenguajes de programación utilizados, tanto para la creación de los simuladores como para la implementación de protocolos en los mismos, son diversos pero se centran alrededor de dos tendencias generales: Java o C/C++. En casi todas las áreas en las que se utiliza software éstos se dividen en propietarios y de código abierto, y los simuladores para WSN no son la excepción. Entre los simuladores de redes conocidos, un ejemplo claro de software propietario es el OPNET[6] mientras que en el área de código abierto destacan el NS[32] y el OMNeT++[45]. Aunque existen otras formas de clasificar los simuladores de redes por

cuestiones de espacio no se incluye aquí una taxonomía completa de los simuladores para WSN (para más información ver [38]).

En la selección del simulador para la presente investigación se siguen los siguientes criterios:

- Simulador general para WSN u orientado a plataforma específica.
- Experiencia como simulador de redes generales y WSN.
- Implementación en el simulador de protocolos y características propias de WSN.
- Facilidad de implementación de otros protocolos no existentes en el simulador.
- Costo de la licencia del software.

La selección realizada está basada fundamentalmente en la revisión de artículos con comparaciones y análisis de desempeño de los diferentes simuladores existentes, como por ejemplo los trabajos publicados en [36, 48, 51]. Para la selección del simulador se consideraran como opciones los simuladores Qualnet[34], OPNET, NS y Castalia/OMNeT++ por ser simuladores generales (i.e. no orientados a una plataforma específica de hardware para WSN) empleados por varios autores en la investigación de protocolos MAC para WSN. En cuanto a la generalidad del simulador, para la presente investigación se considera adecuado utilizar un simulador que no sea orientado a una plataforma de WSN específica para que la validez de los resultados no dependa del hardware subyacente. En el caso de OPNET, NS y OMNeT++, son simuladores maduros, ampliamente utilizados por la comunidad científica y con demostrada calidad en el área de simulación de redes. Qualnet es la versión comercial de un simulador denominado GloMoSim[53], el cual ha sido utilizado por varios investigadores en el área de WSN[19, 50, 55], pero la versión libre ya no está disponible.

OPNET es un simulador maduro, con varias versiones y un número considerable de protocolos implementados. Sin embargo, su aplicabilidad en WSN está limitada por la existencia de pocas implementaciones de protocolos propios de WSN para OPNET. Además, los autores consideran adecuado emplear software libre siempre que sea posible para no utilizar software propietario de los cuales no se paga licencia. Por tanto, las opciones de OPNET y Qualnet quedan descartadas pues sus licencias no están disponibles en nuestra institución y son de un costo considerable. Sin embargo, tanto OMNeT++ como NS son simuladores gratuitos y de código abierto, con implementaciones típicas de WSN que incluyen importantes características de este tipo de redes como, por ejemplo, el uso de RDC y el consumo de energía en los nodos.

Varios autores han realizado comparaciones entre OMNeT++ y NS para WSN, como por ejemplo los trabajos de Weingärtner et. al. en [48] y Xian et. al. en [51]. El OMNeT++ ha demostrado amplias capacidades en el área de WSN a través del uso del simulador Castalia, construido sobre dicha plataforma, y la implementación de nuevos protocolos para WSN es más sencilla en este simulador. Además, los protocolos implementados en NS2, por ejemplo,

están fundamentalmente orientados a TCP/IP, mientras que el simulador Castalia para OMNeT++ está específicamente diseñado para el trabajo con WSN.

Por las razones anteriores, se selecciona el simulador Castalia sobre la plataforma de simulación OMNeT++ para el desarrollo de la presente investigación. A continuación se realiza una breve descripción de este simulador y su utilización dentro del marco de este trabajo.

2.1.1. Características del simulador Castalia/OMNeT++

El nombre de OMNeT++ proviene del inglés *Objective Modular Network Testbed in C++* y es una librería de simulación basada en componentes escrita en C++ diseñada para simular redes de comunicaciones[45]. OMNeT++ no es en sí un simulador de redes sino una plataforma que permite crear simulaciones de redes usando un potente simulador de eventos discretos. Además, en OMNeT++ no solo se puede acceder al código C++ directamente sino que permite la utilización de bloques constructivos con altos niveles de abstracción, creados a partir de un diseño basado en componentes[46].

Cada uno de los componentes de OMNeT++ es un objeto con sus funciones y características propias, así como las interfaces necesarias para comunicarse con otros componentes. Los objetos fundamentales de OMNeT++ son Red, Módulo, Módulo Compuesto y Canal. Una Red es un objeto que define la red y contiene los módulos, submódulos y módulos compuestos que la integran. El objeto Red permite que otros módulos diferentes se comuniquen entre sí a través de los Canales. Un Módulo es un objeto que se ubica dentro de un objeto Red y es capaz de enviar mensajes a otros objetos de tipo Módulo. En una simulación, un Módulo puede ser desde una capa de comunicación en una plataforma específica hasta un conmutador o una computadora personal. Un Módulo Compuesto es un objeto conformado por múltiples objetos de tipo Módulo. La figura 2-1 muestra un módulo compuesto denominado `standardHost` perteneciente a la infraestructura de simulación INET para OMNeT++ y los módulos simples que lo componen. Los Canales permiten establecer enlaces de comunicación entre diferentes Módulos, simples y compuestos. Los Canales permiten a los módulos enviarse mensajes y conectar sus interfaces[46].

Las simulaciones en OMNeT++ se construyen a partir de archivos en lenguaje NED, que describen la topología de la red y sus conexiones, y archivos de configuración con extensión *.ini*, usualmente llamado *omnetpp.ini*, que contiene la configuración de la simulación a realizar sobre la red descrita en el archivo *.ned*. Los archivos de configuración pueden contener varios escenarios entre los cuales se pueden seleccionar los que se desean simular en un momento dado.

Castalia es un simulador basado en OMNeT++ para WSN y redes de dispositivos embebidos de baja potencia en general. Las principales características de Castalia son:

- Modelo de canal avanzado basado en datos empíricos

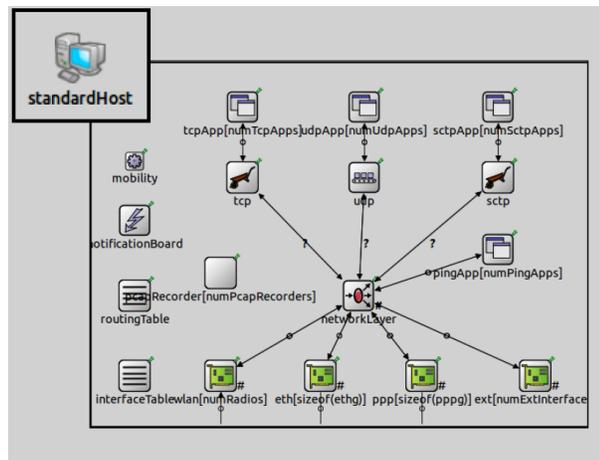


Figura 2–1: Estructura del módulo compuesto `standardHost` en OMNeT++.

- Modelo con definición de mapa de pérdida del trayecto, no simplemente conexiones entre nodos
- Modelo complejo para variación temporal de las pérdidas del trayecto
- Soporte completo para movilidad de los nodos
- Interferencia manejada como intensidad de señal recibida, no como una característica independiente
- Modelo de radio avanzado basado en radios reales para comunicación de baja potencia
 - Probabilidad de recepción basada en Relación de Intensidad de Señal a Ruido e Interferencia (SINR, por sus siglas en inglés), tamaño del paquete, y tipo de modulación. Soporte para modulación por llaveo de fase (PSK, por sus siglas en inglés) y de frecuencia (FSK, por sus siglas en inglés), y modulaciones personalizadas a través de la definición de curvas SNR-BER.
 - Soporte para múltiples niveles de potencia de transmisión con variación individual en los nodos
 - Estados con diferentes consumos de energía y demoras de conmutación entre ellos
 - Flexibilidad en cuanto a verificación de portadora (basada en encuesta y en interrupción)
- Modelación extendida para redes de sensores
 - Modelo físico altamente flexible
 - Ruido y consumo de potencia de los sensores
- Desplazamiento de reloj de los nodos y consumo de potencia del CPU
- Protocolos MAC y de ruteo para WSN disponibles
- Diseño orientado a la adaptación y expansión

Las características del Castalia como simulador para WSN están altamente condicionadas por su empleo de la estructura modular del OMNeT++. La estructura básica del Castalia es la que se muestra en la figura 2–2, donde las flechas representan el traspaso de mensajes entre los módulos. Es importante destacar que los nodos no se conectan entre

sí directamente sino a través del módulo de canal inalámbrico. Los nodos también están conectados a través del proceso físico que están monitoreando usando un módulo que contiene la “verdad” cuantitativa del proceso físico. Los nodos muestrean el proceso físico en tiempo y espacio para obtener las lecturas de sus sensores.

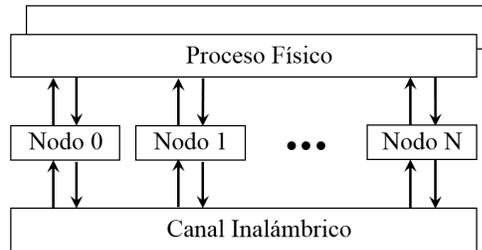


Figura 2-2: Estructura básica del simulador Castalia.

La estructura interna del módulo compuesto de nodo se muestra en la figura 2-3, donde las flechas de línea sólida indican el traspaso de mensajes y las de línea discontinua representan las llamadas a funciones. Por ejemplo, la mayoría de los módulos llaman una función del administrador de recursos para señalar la energía consumida. Las estructuras mostradas en las figuras 2-2 y 2-3 están implementadas en Castalia a través de lenguaje NED de OMNeT++ pues con ese lenguaje se pueden definir módulos fácilmente. La estructura modular del lenguaje NED está reflejada en la jerarquía de directorios del Castalia pues cada módulo corresponde a un directorio que siempre contiene un archivo *.ned* que lo define. Si el módulo es compuesto entonces hay subdirectorios para la definición de los submódulos. Si es un módulo simple entonces en el directorio está el código C++ que define su comportamiento (archivos *.cc* y *.h*).

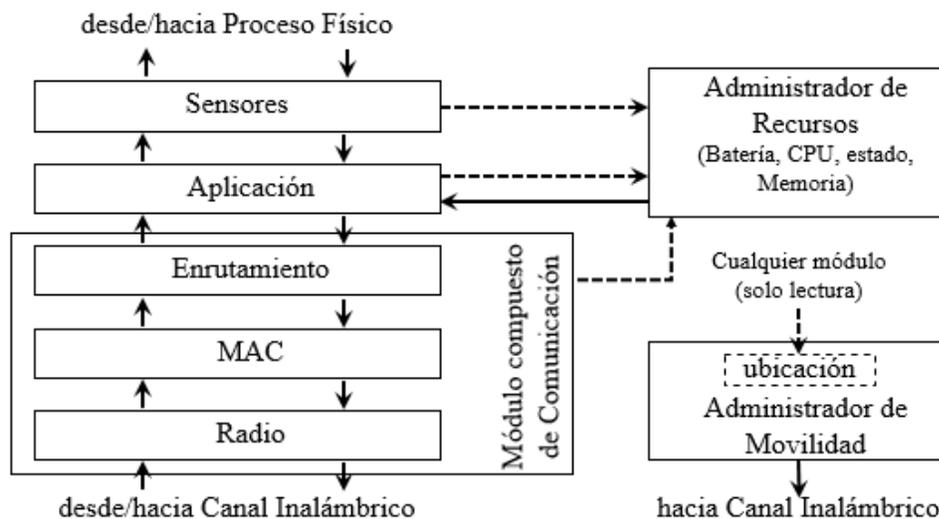


Figura 2-3: Estructura básica del módulo compuesto de Nodo en Castalia.

Castalia incorpora además un *script* para correr las simulaciones, denominado simplemente *Castalia*, y dos *scripts* para ayudar en el análisis de los resultados de la simulación y en la creación de gráficos, denominados *CastaliaResults* y *CastaliaPlot* respectivamente.

Los detalles sobre la utilización de los mismos pueden consultarse en el manual de usuario del simulador[5].

Las ventajas de Castalia como simulador para WSN, soportado sobre una plataforma de simulación madura, potente y de código abierto como el OMNeT++, proporcionan un ambiente propicio para el desarrollo de la presente investigación. Para realizar los experimentos necesarios en el análisis de desempeño del protocolo MAC IEEE 802.15.4 es necesario establecer un modelo de simulación capaz de proporcionar buenos resultados en cuanto a validez y aplicabilidad. El modelo de simulación elaborado se describe en la siguiente sección.

2.2. Modelo de simulación

De manera general, el modelo de simulación sigue la estrategia definida por Castalia, ilustrada en las figuras 2-2 y 2-3. Sin embargo, por las características de Castalia, los modelos de sensor y canal inalámbrico son altamente flexibles y deben ser configurados en correspondencia con los objetivos de la investigación. A continuación se realiza una explicación de las decisiones tomadas para elaborar este modelo de simulación y los parámetros utilizados en los escenarios de simulación. Los parámetros generales de la red se muestran en la tabla 2-1. Es importante señalar que el despliegue se realiza de manera uniforme pero garantizando que el nodo sumidero quede ubicado en el centro del área de despliegue. Además, se emplean otros valores de cantidad de nodos en escenarios donde la densidad de nodos de la red es un factor bajo observación.

Tabla 2-1: Parámetros generales de la red.

| Parámetro | Valor |
|-------------------------|----------------|
| Tiempo de Simulación | 301 segundos |
| Dimensiones del terreno | 30 x 30 metros |
| Despliegue | Uniforme |

2.2.1. Canal Inalámbrico

El modelo de canal inalámbrico implementado por Castalia persigue establecer un modelo realista basado en el cálculo de las pérdidas del trayecto de manera independiente para cada enlace, utilizando la ecuación 2.1 para realizar el cálculo. En dicha ecuación $PL(d_0)$ son las pérdidas del trayecto para una distancia de referencia d_0 , η es el exponente de pérdidas del trayecto, d es la distancia entre emisor y receptor, y X_σ es una variable aleatoria gaussiana de media cero con desviación estándar igual a σ . El valor de σ , cuando es diferente de cero, establece una diferencia en cuanto a intensidad de señal recibida para nodos que se encuentran a la misma distancia de un transmisor. Todos estos parámetros, salvo la distancia entre los nodos, son configurables a través del módulo de canal inalámbrico. Los valores seleccionados se muestran en la tabla 2-2.

$$PL(d) = PL(d_0) + 10 * \eta * \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (2.1)$$

Existe otro parámetro relacionado con las pérdidas del trayecto, denominado sigma bidireccional (σ_{bd}), que define la desviación estándar de una variable aleatoria gaussiana de media cero encargada de crear diferencia entre los dos enlaces individuales que conforman cada enlace bidireccional. Si se desea establecer un escenario donde todos los nodos que se encuentren a la misma distancia de un transmisor reciban la misma potencia y hacer que todos los enlaces bidireccionales sean idénticos en ambos sentidos, entonces σ y σ_{bd} deben ponerse a cero. En nuestra investigación se pretende utilizar un escenario suficientemente realista para brindar generalidad a los resultados y, por tanto, se utilizan los valores por defecto de los parámetros anteriores. Con el modelo de canal inalámbrico de Castalia también se puede definir un mapa de pérdidas de trayecto y de variación temporal con mediciones reales y emplearlos en la simulación a través los parámetros `pathLossMapFile` y `temporalModelParametersFile`, pero en nuestra investigación no se utilizan.

Tabla 2-2: Parámetros del módulo de Canal Inalámbrico.

| Parámetro | Valor |
|------------------------|----------|
| Movilidad de los nodos | Falso |
| Exponente de pérdidas | 2.4 |
| $PL(d_0)$ | 55 dBm |
| d_0 | 1 metro |
| σ | 4.0 |
| σ_{bd} | 1.0 |
| Umbral de señal | -100 dBm |

2.2.2. Módulo de Radio

En el módulo de radio de los nodos se pueden definir los parámetros que gobiernan la interfaz de radio. En nuestra simulación se utiliza el radio CC2420 por ser uno de los más comunes en los dispositivos reales de WSN. Para ello se modifica el parámetro `RadioParametersFile` utilizando un archivo de definición de las características del radio disponible en la instalación de Castalia y que está en correspondencia con las características reales del dispositivo. La potencia de salida que se emplee debe estar en correspondencia con la interfaz de radio seleccionada. En nuestra investigación se define una potencia de 0 dBm pues el tiempo de simulación no es suficiente para que se agote la energía de los nodos.

Uno de los parámetros de mayor importancia para la presente investigación es el modelo de colisiones. En Castalia se puede seleccionar uno de tres modelos de colisiones a través del parámetro `collisionModel`. Los tres modelos de colisión disponibles en Castalia son:

- Modelo sin interferencia (`collisionModel = 0`), donde si a un nodo llegan dos o más señales simultáneamente, siempre se reciben todas.
- Modelo de interferencia simple (`collisionModel = 1`), donde siempre que se reciban dos o más señales en un mismo nodo, independientemente de su potencia, ocurre una colisión.
- Modelo aditivo (`collisionModel = 2`), donde la intensidad de las señales recibidas en un nodo se suman en una misma señal que es procesada y se determina si se recibe una de ellas o ninguna.

El último modelo de interferencia es más realista y, por tanto, es el utilizado en la presente investigación. El otro parámetro del módulo de radio que se modifica en la configuración de las simulaciones de este trabajo es la cantidad de símbolos utilizados para determinar la indicación de intensidad de señal recibida (RSSI, por sus siglas en inglés). Los valores seleccionados para los diferentes parámetros del módulo de radio se muestran en la tabla 2-3.

Tabla 2-3: Parámetros del módulo de Radio.

| Parámetro | Valor |
|--------------------------|-------------|
| Interfaz de radio | CC2420 |
| Potencia de transmisión | 0 dBm |
| Modelo de interferencia | Aditivo(2) |
| Frecuencia de portadora | 2.4 GHz |
| Tasa de transferencia | 250 Kbps |
| Bits por símbolo | 4 bits |
| Umbral para CCA | -95 dBm |
| Símbolos para RSSI | 16 símbolos |
| Tamaño Máximo de trama | 2500 bytes |
| Cabecera máxima de trama | 6 bytes |

2.2.3. Módulo MAC

En el módulo MAC se emplea el protocolo IEEE 802.15.4 con CSMA/CA ranurado, tal y como se implementa en Castalia. Se introducen algunas modificaciones a la capa física a través del módulo MAC como la utilización de una tasa de transferencia de 250 *Kbps*, por ser un valor típico de los dispositivos reales de WSN; y la cantidad de bits por símbolo se configura con valor 4 para estar en correspondencia con la interfaz de radio utilizada, *i.e.* CC2420 con modulación QPSK. El nodo 0 se define en la configuración de la simulación como sumidero de la aplicación y coordinador de la PAN a nivel MAC, y se ubica en el centro del área de despliegue de la red. La configuración del protocolo en sí no se varía significativamente de los valores establecidos por defecto en el Castalia por estar en correspondencia con los valores típicos admitidos en el estándar IEEE 802.15.4, quedando los parámetros del modo mostrado en la tabla 2-4.

Tabla 2-4: Parámetros del módulo MAC.

| Parámetro | Valor |
|-----------------------------|------------|
| Protocolo MAC | 802.15.4 |
| Cabecera de paquete | 6 bytes |
| CSMA/CA ranurado | Habilitado |
| Orden de trama | 4 |
| Orden de Guía | 6 |
| Unidad de período de retiro | 20 ms |
| Duración base de ranura | 60 ms |
| Ranuras por supertrama | 16 ranuras |
| Máximo de intentos de Tx | 2 |
| Demora de Inactivo a Tx | 0.2 ms |
| Demora de Rx a Tx | 0.2 ms |

2.2.4. Módulo de Aplicación

Uno de los aspectos fundamentales de la presente investigación es el análisis del desempeño del protocolo IEEE 802.15.4 en cuanto a carga de tráfico. Por esta razón se selecciona para el módulo de aplicación, una configuración orientada a la variación de las razones de generación de paquetes en los nodos y analizar la latencia de los paquetes dentro de la red. Esta aplicación viene definida en el Castalia y se denomina **ThroughputTest**. Esta aplicación va a servir de base para la variación de la carga de tráfico dentro de la red utilizando el parámetro `packet_rate`, que define la razón de paquetes por segundo a nivel de aplicación que generan los nodos (R_p). La configuración general utilizada se muestra en la tabla 2-5.

Tabla 2-5: Parámetros del módulo de Aplicación.

| Parámetro | Valor |
|---|----------------|
| Nombre de la aplicación | ThroughputTest |
| Demora inicial | 1 segundo |
| Máximo valor del histograma de latencia | 10000 ms |
| Cantidad de contenedores del histograma de latencia | 30 |
| Carga útil de datos | 100 bytes |
| Cabecera de paquete | 5 bytes |

2.3. Escenarios de Simulación

Para la realización de la presente investigación se han diseñado escenarios de simulación correspondientes a cada una de las características de la red cuyo efecto se va a explorar. Estas características son las siguientes:

1. Carga de tráfico de la red

2. Densidad de nodos en la red (D_N)
3. Niveles de RDC
4. Niveles de interferencia

La repercusión en el desempeño del protocolo provocada por la variación de cada uno de los elementos anteriores se mide a partir del *goodput* de la red a nivel de radio y MAC, la cantidad de paquetes transmitidos y recibidos por los nodos, la latencia de los paquetes en la red y el consumo de energía en los nodos. Donde el *goodput* de la red se define como la relación entre los paquetes recibidos entre el total de paquetes transmitidos. En las siguientes secciones se describen en detalle los escenarios de simulación utilizados. Todos los escenarios son simulados con un número suficiente de semillas diferentes para el generador pseudo-aleatorio del simulador de eventos discretos como para establecer niveles aceptables de validez estadística de los resultados obtenidos. Excepto en el escenario 3, el RDC de los nodos es configurado al 25 % usando los parámetros correspondientes de Castalia: `beaconOrder = 6` y `frameOrder = 4`. El anexo A contiene los archivos de configuración de cada uno de los escenarios.

2.3.1. Escenario 1: Carga de Tráfico

Este escenario de simulación se diseña con el objetivo de medir el efecto de la variación de la carga de tráfico en la red. La carga de tráfico de la red está dada por el producto de la cantidad de nodos que componen la red, la razón de paquetes por segundo de cada nodo, y el tamaño de los paquetes. La cantidad de nodos de la red tiene un efecto considerable en los niveles de contención por el medio en este protocolo puesto que el máximo de ranuras de tiempo del período activo de la supertrama es fijo en 16. Por esta razón, en el presente escenario se mantiene constante la cantidad de nodos de la red. El tamaño de los paquetes de información de una red WSN está en el orden de las decenas de bytes. Por tanto, en esta investigación el tamaño de los paquetes de la red se mantiene constante a 125 bytes.

Por lo explicado antes, la variación de la carga de tráfico de la red se realiza a través de R_p , expresada en paquetes por segundo. La simulación se realiza con varios valores de cantidad de nodos dentro de la red para verificar los efectos asociados a la variación de carga de tráfico y su relación con la cantidad de nodos de la red. Los parámetros de configuración específicos de este escenario de simulación se muestran en la tabla 2-6, el resto de los parámetros de los módulos empleados se describen en la sección 2.2.

Los valores empleados para el parámetro R_p han sido seleccionados con el fin de mostrar diferentes cargas de tráfico dentro de la red pues $R_p = 0,25 \text{paquetes/segundo}$ constituye un valor considerablemente bajo para este tipo de redes, mientras que $R_p \geq 4 \text{paquetes/segundo}$ se pueden considerar altas y tienden a saturar la red. Los resultados de la simulación de este escenario confirman esta afirmación.

Tabla 2-6: Parámetros del escenario de simulación 1.

| Parámetro | Valor |
|----------------------------|---|
| Tiempo de simulación | 1201 segundos |
| Área de despliegue | 30 x 30 metros |
| Tamaño de los paquetes | 125 bytes |
| RDC | 25 % |
| Cantidad de nodos | [10, 15, 20] nodos |
| Razón de paquetes por nodo | [0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5,... ...2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7] paquetes/seg. |

2.3.2. Escenario 2: Densidad de Nodos

El objetivo de este escenario de simulación es medir el efecto de la densidad de nodos en la red (D_N) sobre el desempeño del protocolo IEEE 802.15.4. Para variar D_N se mantiene un tamaño constante del área de despliegue de la red y se aumenta la cantidad de nodos que la componen con intervalos de 20 nodos en cada corrida de la simulación. Se utilizan varios valores de R_p para diferenciar el efecto de la densidad de nodos del provocado por la razón de paquetes. Los valores utilizados específicamente para la configuración de este escenario se muestran en la tabla 2-7, el resto de los parámetros de la simulación se mantienen con los valores mostrados en la sección 2.2.

Tabla 2-7: Parámetros del escenario de simulación 2.

| Parámetro | Valor |
|----------------------------|--|
| Tiempo de simulación | 301 segundos |
| Área de despliegue | 30 x 30 metros |
| Tamaño de los paquetes | 125 bytes |
| RDC | 25 % |
| Cantidad de nodos | [5,10,30,50,70,90,110,... ...130,150,170] nodos |
| Razón de paquetes por nodo | [0.5,1.0,2.0,5.0] paquetes/seg. |

2.3.3. Escenario 3: Niveles de RDC

La eficiencia energética es uno de los aspectos más importantes dentro de las WSN. Como se ha planteado en el capítulo 1, para aumentar la duración de las baterías de los nodos se utiliza la técnica de RDC. Sin embargo, el empleo de RDC tiende a incrementar la latencia dentro de la red y disminuir el *throughput* que se puede alcanzar. Este escenario se diseña con el objetivo de analizar el efecto de diferentes niveles de RDC en el desempeño de la red y del protocolo MAC IEEE 802.15.4. Para variar la proporción del tiempo que los nodos permanecen en estado inactivo, se utilizan los parámetros que controlan la duración del período activo de la supertrama y el tiempo total de duración de la misma, usando las ecuaciones 1.1 y 1.2. Por conveniencia, estas ecuaciones se reproducen a continuación.

$$BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{macBeaconOrder} \quad (2.2)$$

$$SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{macSuperframeOrder} \quad (2.3)$$

El RDC se calcula como la relación entre BI y SD , del siguiente modo:

$$RDC = \frac{SD}{BI} = \frac{aBaseSuperframeDuration * 2^{macSuperframeOrder}}{aBaseSuperframeDuration * 2^{macBeaconOrder}}$$

Simplificando el término de $aBaseSuperframeDuration$, se obtiene

$$RDC = 2^{(macSuperframeOrder - macBeaconOrder)} \quad (2.4)$$

El atributo $macBeaconOrder$ se configura en Castalia usando el parámetro denominado `beaconOrder` del protocolo IEEE 802.15.4, y el atributo $macSuperframeOrder$, a través del parámetro `frameOrder`. Utilizando la ecuación 2.4 se puede calcular el valor de RDC para cualquier par de valores posibles¹ de `beaconOrder` y `frameOrder`. En este escenario de simulación se mantiene el valor por defecto del parámetro `frameOrder` (*i.e.* 4) y se varía el `beaconOrder` desde 4 hasta 10. Con `beaconOrder` = 10 se alcanza un RDC del 1,56 %, lo cual es un valor aceptablemente bajo para WSN[4]. Además, manteniendo constante el `frameOrder` se garantiza que la duración del período activo se mantiene constante mientras se varía el RDC. Los valores de RDC utilizados en la simulación y su configuración se muestra en la tabla 2–8.

Tabla 2–8: RDC en función de los parámetros `beaconOrder` y `frameOrder`.

| | | | | | | | |
|--------------------------|-----|----|----|------|------|-------|------|
| <code>frameOrder</code> | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| <code>beaconOrder</code> | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| RDC(%) | 100 | 50 | 25 | 12.5 | 6.25 | 3.125 | 1.56 |

Este escenario se simula para varias razones de paquetes por nodo con el fin de diferenciar el efecto de de la variación del RDC del causado por la carga de tráfico de la red. Las razones de paquetes seleccionadas constituyen valores de carga de tráfico baja y media para esta red, según se demuestra con la simulación del escenario de Carga de tráfico en la sección 3.1, figura 3–1. Debido al bajo valor de RDC final y con el fin de lograr resultados de simulación válidos, se establece el tiempo de simulación de este escenario en 5 minutos para garantizar que aún con el más bajo RDC se envíen más de 1000 paquetes dentro de

¹Los valores de `beaconOrder` y `frameOrder` para una red IEEE 802.15.4 basada en Guías tienen que cumplir con la condición de $0 \leq \text{frameOrder} \leq \text{beaconOrder} \leq 14$

la red. La configuración específica de este escenario se resume en la tabla 2–9, el resto de los parámetros de los módulos empleados se describen en la sección 2.2.

Tabla 2–9: Parámetros del escenario de simulación 3.

| Parámetro | Valor |
|----------------------------|-----------------------------|
| Tiempo de simulación | 3001 segundos |
| Área de despliegue | 30 x 30 metros |
| Tamaño de los paquetes | 125 bytes |
| Cantidad de nodos | 10 nodos |
| Razón de paquetes por nodo | [0.5, 1, 1.5] paquetes/seg. |
| RDC | ver tabla 2–8 |

2.3.4. Escenario 4: Interferencia Externa

Como ya se ha discutido antes en este informe de investigación, las WSN suelen estar afectadas por interferencia externa de otros sistemas que utilizan la misma banda de frecuencia para la comunicación y, frecuentemente, radios más potentes. Ejemplos típicos de sistemas que utilizan la banda de $2,4GHz$ y cuya coexistencia con despliegues de WSN es común, son las redes IEEE 802.11 y los dispositivos Bluetooth. Por estas razones, los protocolos diseñados para WSN deben mantener un desempeño aceptable en presencia de sistemas interferentes.

Este escenario de simulación se diseña con el objetivo de analizar el desempeño del protocolo MAC IEEE 802.15.4 ante diferentes niveles de interferencia. Para generar la interferencia se divide el área de despliegue de la WSN en cuadrantes y se ubica un nodo interferente en el centro de cada uno de ellos. Los nodos interferentes tienen las mismas características que los que integran la WSN desplegada pero están configurados con otro protocolo MAC para evitar que se asocien a la misma. La potencia de los nodos interferentes se mantiene en -15 dBm , lo cual es suficiente para ocupar el canal, evitando que los nodos WSN accedan a este, y provocar el fallo de las transmisiones en curso.

El nivel de interferencia que introduce un nodo está relacionado, fundamentalmente, con la R_p y el tamaño de los paquetes transmitidos por los nodos interferentes. Por tanto, este escenario se divide en dos escenarios:

Escenario 4.1: Aquí se verifica el efecto de la variación de la razón de generación de paquetes de los nodos interferentes (R_I).

Escenario 4.2: Aquí se verifica el efecto de la variación del tamaño de los paquetes transmitidos por los nodos interferentes (S_I).

La red WSN desplegada está formada por 10 nodos generando paquetes de 125 bytes a una razón de $R_p = 1\text{ paquete/segundo}$. La potencia de transmisión empleada es de 0 dBm . El resto de los parámetros de configuración para este escenario son los descritos en el modelo

de simulación en la sección 2.2. La descripción específica de estos escenarios se resume en la tabla 2–10

Tabla 2–10: Parámetros de los escenarios de simulación 4.1 y 4.2.

| Parámetro | Valor (Escenario) |
|----------------------|---|
| Tiempo de simulación | 1201 segundos |
| RDC | 25 % |
| Área de despliegue | 30 x 30 metros |
| Cantidad de nodos | Total: 14 WSN: 10 Red Interferente: 4 |
| Potencia | WSN: 0 dBm Red Interferente: -15 dBm |
| R_I | E4.1: [3.125,6.25,9.375,15.625,... ...,18.75,21.875,28.125] paquetes/seg. E4.2: [10,20] paquetes/seg. |
| S_I | E4.1: [1000,2000] bytes E4.2: [156,312,468,780,936,1092,... ...,1404,1560] bytes |
| R_p | 1 paquete/seg |

2.4. Consideraciones finales del capítulo

En el presente capítulo se ha fundamentado la selección de Castalia como simulador de WSN sobre la plataforma OMNET++, incluyendo una descripción general del simulador y su funcionamiento. Se ha descrito un modelo de simulación donde se explican las decisiones tomadas en relación a los diferentes parámetros de los componentes del modelo de simulación. A partir de dicho modelo se han diseñado cuatro escenarios de simulación en los cuales se examina el desempeño del protocolo MAC IEEE 802.15.4 bajo diferentes condiciones de tráfico e interferencia.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la simulación de los escenarios descritos en el capítulo anterior y se realiza una discusión de los mismos. Para obtener los resultados se utiliza el *script* `CastaliaResults` con las diferentes opciones que el mismo provee. La discusión no se limita al desempeño del protocolo MAC IEEE 802.15.4 sino que además se discute el comportamiento de la red ante las diferentes condiciones simuladas. Finalmente, se resumen algunas consideraciones finales sobre los resultados de las simulaciones y el desempeño de la red en general, con énfasis en el protocolo MAC IEEE 802.15.4.

3.1. Escenario 1: Carga de Tráfico

La simulación de este escenario es indispensable no solo para evaluar el desempeño del protocolo ante diferentes condiciones de carga de tráfico, sino además para sustentar varias de las decisiones tomadas en el diseño del resto de los escenarios de simulación. Este escenario permite corroborar los valores de carga de tráfico que se pueden considerar como niveles bajo, medio y alto para la red simulada. Para demostrar estos valores, se muestran en la figura 3–1 las gráficas de paquetes transmitidos a nivel de radio (3–1a) y de paquetes recibidos a nivel de aplicación (3–1b). El comportamiento de las gráficas demuestra que el valor de carga de tráfico que provoca la saturación de la red es el mismo tanto a nivel de radio como de aplicación para los valores de (D_N) simulados. En estas gráficas se puede apreciar que, por ejemplo, para una red compuesta por 20 nodos en un área de despliegue de $900m^2$, el valor de $R_p = 0,5 \text{ paquetes/segundo}$ genera una carga de tráfico baja; $R_p = 1 \text{ paquete/segundo}$, carga media; y valores de $R_p \geq 2 \text{ paquetes/segundo}$, carga de tráfico alta. A partir de estas gráficas se puede concluir el máximo número de paquetes que puede cursar la red no está determinado por R_p .

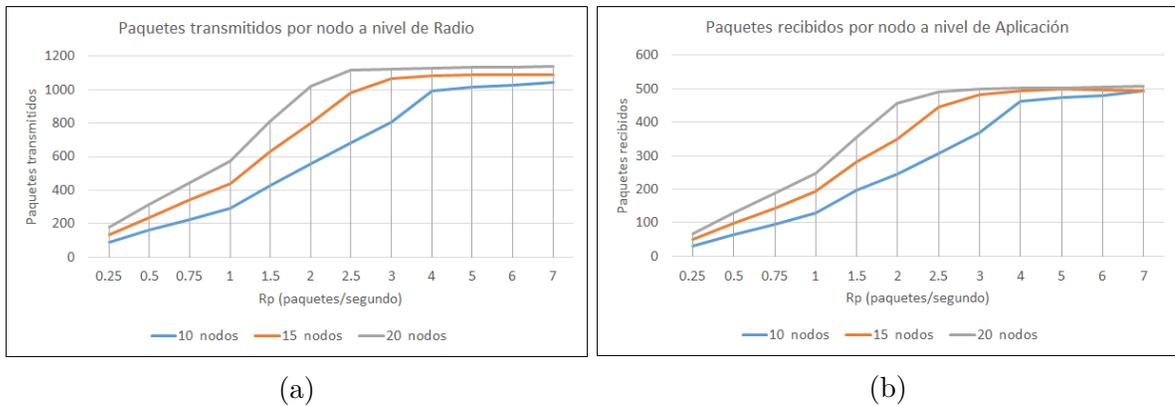
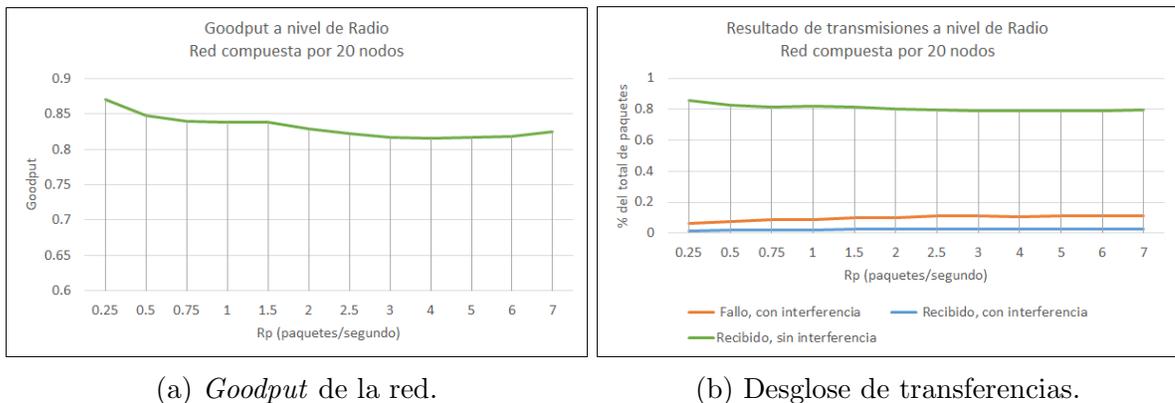


Figura 3–1: Escenario 1: Paquetes transmitidos promedio por nodo a nivel de Radio (a) y recibidos a nivel de Aplicación por cada nodo (b).

El aumento de la carga de tráfico provoca un incremento de la contención por el medio y de los niveles de interferencia interna¹ de la red. La figura 3–2a muestra el *goodput* a nivel de radio de la red, compuesta por 20 nodos, notándose una ligera disminución con el aumento de R_p . En la figura 3–2b se puede apreciar el aumento del porcentaje de transmisiones fallidas por interferencia y del porcentaje de paquetes recibidos a pesar de ésta, lo cual trae como consecuencia una ligera disminución de la cantidad de paquetes recibidos exitosamente sin interferencia y del *goodput* de la red a este nivel. Es importante destacar que los resultados de paquetes recibidos con interferencia o sin ella se refieren a interferencia proveniente de cualquier fuente, ya sea interna o externa. Sin embargo, el aumento de los niveles de interferencia en los escenarios 1, 2 y 3 se debe a interferencia interna pues no hay fuentes de interferencia externa presentes en ellos.

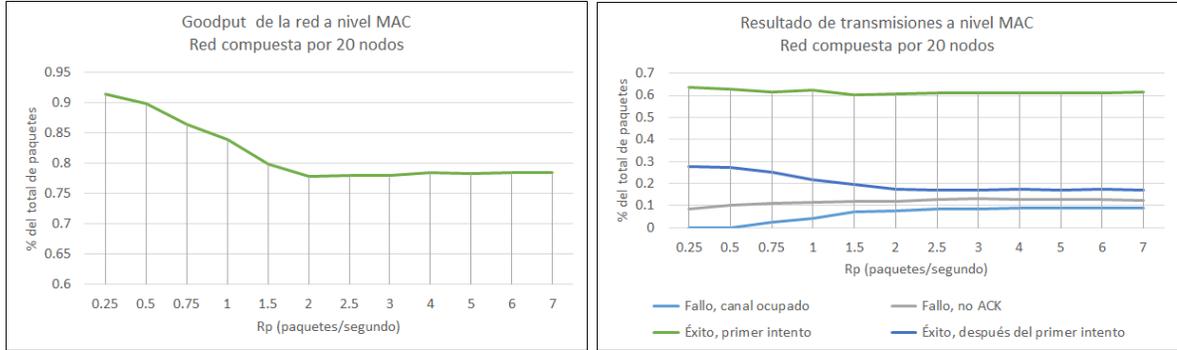


(a) *Goodput* de la red. (b) Desglose de transferencias.
Figura 3–2: Escenario 1: Comportamiento de la red a nivel de Radio.

La disminución del desempeño a nivel de radio tiene repercusiones a nivel MAC pues el aumento de la contención y de la interferencia interna de la red tiende a incrementar el

¹Se define como interferencia interna de la red a la provocada por los propios nodos pertenecientes a la WSN. Las transmisiones simultáneas dentro de un mismo rango son interpretadas como señales interferentes por los nodos receptores.

porcentaje de paquetes que falla por estar ocupado el medio o porque no se recibe el ACK correspondiente. Como se muestra en la figura 3–3a, el *goodput* de la red a nivel MAC disminuye a medida que aumenta la carga de tráfico, especialmente a partir de valores de alta carga de tráfico. En este caso, se utiliza igualmente una red compuesta por 20 nodos, por lo que una $R_p \geq 2 \text{ paquetes/segundo}$ se considera alta carga de tráfico (véase figura 3–1). Las causas de esta disminución en el *goodput* de la red se reflejan en la figura 3–3b, donde se puede verificar que el porcentaje de transacciones fallidas por no recibo de ACK o por estar ocupado el canal aumentan con R_p .

(a) *Goodput* de la red.

(b) Desglose de transferencias.

Figura 3–3: Escenario 1: Comportamiento de la red a nivel MAC.

El valor $R_p = 2 \text{ paquetes/segundo}$ vuelve a mostrarse como punto crítico de carga de tráfico para la red cuando se analiza la latencia de los paquetes, pues cuando la red comienza a saturarse, aumenta la contención por el medio y los nodos tienen menos oportunidades de transmitir sus paquetes. La figura 3–4 contiene las gráficas de porcentaje de paquetes que han llegado con determinados rangos de latencia en función de la carga de tráfico. Nótese que no se incluye un histograma de latencia sino que se muestra el comportamiento del porcentaje de paquetes que llega con cada rango de latencia (gráficas individuales dentro de los ejes) en función de la razón de generación de paquetes de los nodos (valores del eje X). No se incluyen las gráficas para intervalos de latencia media pues no añaden información relevante a la figura. Estas gráficas demuestran que la latencia se mantiene por debajo de 2 segundos en la mayoría de los paquetes cuando $R_p \leq 2 \text{ paquetes/segundo}$, e incrementa significativamente a partir de ese valor.

Una característica muy importante de los nodos de WSN es que el consumo de energía de sus interfaces de radio en modo de transmisión y recepción es comparable. Esta característica es muy específica de este tipo de redes pues en la mayoría de los sistemas de comunicaciones el consumo de energía es proporcional al tiempo que el sistema pasa transmitiendo, y disminuye notablemente cuando el sistema está en estado de recepción. Incluso, en algunos radios comunes dentro de las plataformas de WSN[42, 43] el consumo de energía cuando están recibiendo es mayor que cuando están transmitiendo. Específicamente el radio CC2420 de Texas Instruments, utilizado en las simulaciones de la presente

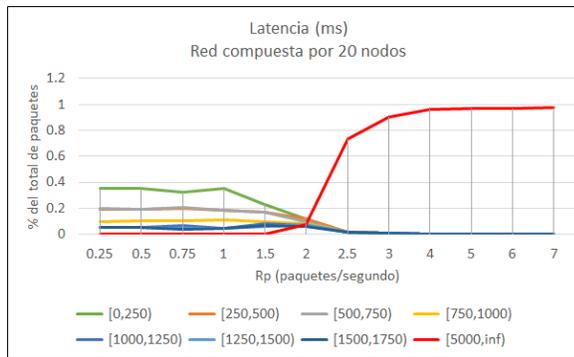


Figura 3-4: Escenario 1: Latencia promedio de los paquetes.

investigación, consume $18,8mA$ en estado de recepción y $17,4mA$ cuando transmite con su potencia máxima de 0 dBm [43]. Por esta razón, es importante destacar en este escenario de simulación que el consumo de energía en los nodos se mantiene casi constante ante la variación de la carga de tráfico, para cada valor de D_N , tal y como se muestra en la figura 3-5.

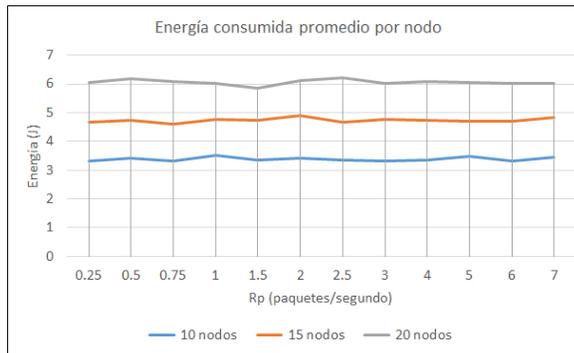


Figura 3-5: Escenario 1: Consumo de energía promedio de cada nodo.

Los resultados obtenidos de la simulación de este escenario demuestran que la carga de tráfico de la red afecta negativamente el desempeño del protocolo MAC IEEE 802.15.4 para valores superiores al punto de saturación de la red. Se ha demostrado que cargas de tráfico superiores a ese punto provocan un aumento radical de la latencia dentro de la red. Por último, se demuestra que la eficiencia energética del protocolo no está condicionada por la razón de generación de paquetes de los nodos, debido a la característica particular de los dispositivos de WSN de tener consumos de energía muy similares en estado de recepción y de transmisión.

3.2. Escenario 2: Densidad de Nodos

El objetivo de este escenario de simulación es describir el desempeño de la red, específicamente la capa MAC, ante la variación de la densidad de nodos de la red. La figura 3-6 muestra la cantidad promedio de paquetes transmitidos a nivel de radio (3-6a) y recibidos a nivel de aplicación (3-6b) para este escenario. Cuando se comparan ambas gráficas se percibe que la variación en la cantidad de paquetes recibidos a nivel de aplicación no está en correspondencia con el aumento lineal de la cantidad de paquetes transmitidos a nivel de

radio. El aumento lineal de (D_N) induce un crecimiento lineal de la cantidad de paquetes que son transmitidos a nivel de radio. Sin embargo, la cantidad de paquetes recibidos a nivel de aplicación aumenta con D_N cuando esta es baja ($D_N = \{0,006, 0,011, 0,033\}$ nodos/m²) pero a partir de $D_N = 0,078$ nodos/m² la variación de este parámetro cambia el comportamiento de la red. Para $D_N \geq 0,1$ la cantidad de paquetes recibidos a nivel de aplicación disminuye a medida que aumenta D_N , incluso para valores de R_p que inducen baja carga de tráfico como, por ejemplo, $R_p = 0,5$ paquetes/segundo.

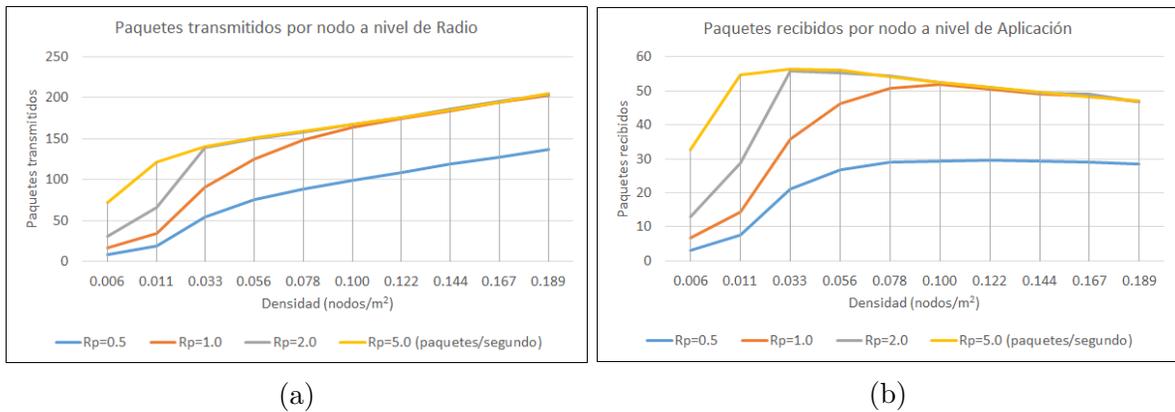
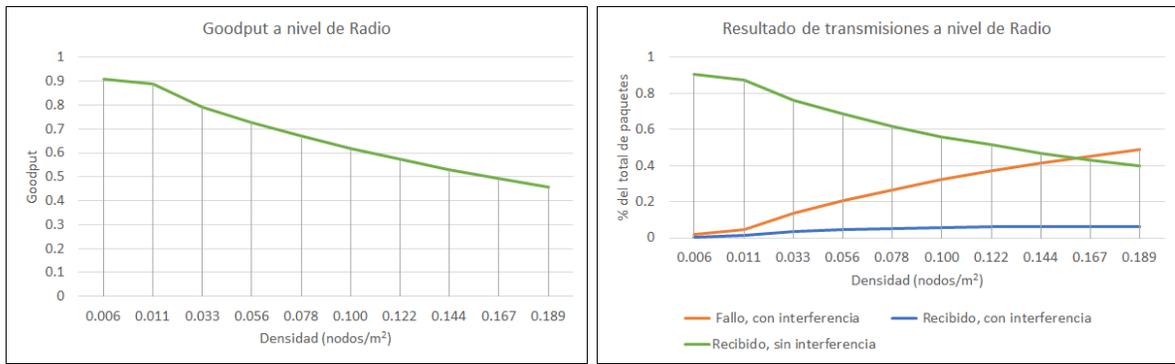


Figura 3–6: Escenario 2: Paquetes transmitidos promedio por nodo a nivel de Radio (a) y recibidos a nivel de Aplicación por cada nodo (b).

La causa de este comportamiento es que el aumento de D_N induce un incremento de la contención por el canal y las colisiones, haciendo que aumente la interferencia interna de la red. Esto se puede comprobar verificando el comportamiento de las comunicaciones a nivel de radio, donde se puede constatar que el porcentaje de transmisiones que fallan debido a interferencia aumenta con el incremento de D_N , lo que hace que disminuya el porcentaje de paquetes recibidos. La figura 3–7 ilustra este comportamiento. En la figura 3–7a se muestra el comportamiento del *goodput* de la red, demostrándose que a medida que aumenta D_N disminuye el *goodput*. Las causas de este fenómeno explicadas antes se evidencian en la figura 3–7b. Nótese el aumento del porcentaje de transmisiones fallidas por causa de interferencia y la consiguiente disminución del porcentaje de recepción de paquetes sin interferencia.

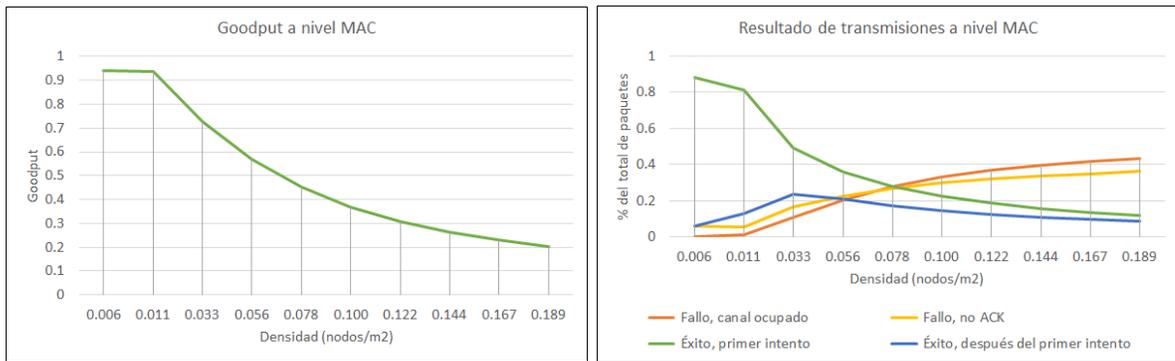
Al analizar el comportamiento de la red a nivel MAC, se demuestra que el aumento de D_N y su correspondiente repercusión a nivel de radio provocan un incremento en las transmisiones fallidas a nivel MAC y la disminución del *goodput* de la red. El comportamiento del *goodput* de la red en función de la densidad de nodos se muestra en la figura 3–8a. La causa de este fenómeno está dada por el hecho de que los nodos no pueden acceder al canal cuando lo necesitan, provocando retransmisiones frecuentes que obligan a los nodos a descartar los paquetes después que el número máximo de retransmisiones ha sido alcanzado. Además, debido a que los paquetes ACK se envían usando un mecanismo ALOHA, cuando aumenta la contención en la red aumentan las colisiones de paquetes ACK con

(a) *Goodput* de la red.

(b) Desglose de transferencias.

Figura 3–7: Escenario 2: Comportamiento de la red a nivel de Radio.

transmisiones de paquetes de información entre los nodos. Entonces, el porcentaje de transmisiones exitosas disminuye con el aumento de D_N por el efecto de la interferencia interna y los fallos en la transferencia de mensajes ACK, tal y como se muestra en la figura 3–8b.

(a) *Goodput* de la red.

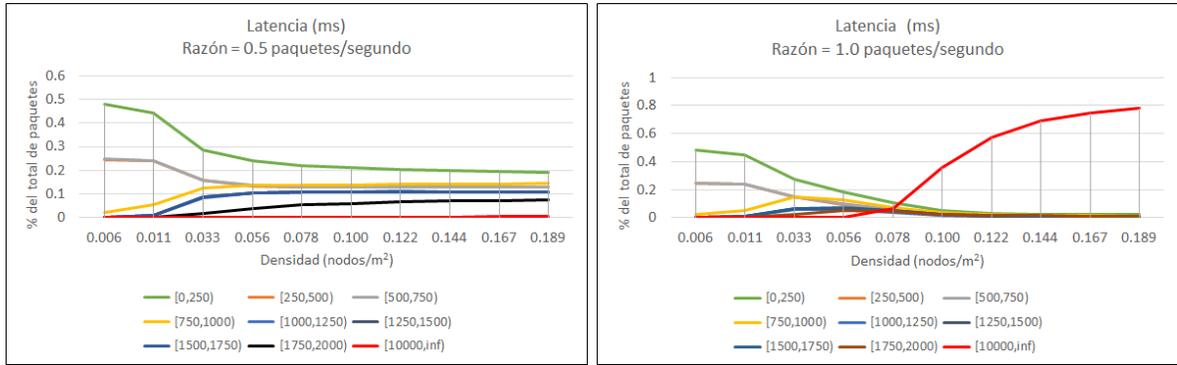
(b) Desglose de transferencias.

Figura 3–8: Escenario 2: Comportamiento de la red a nivel MAC.

Es importante señalar que el mecanismo ACK provoca el fallo de transferencias en las cuales el paquete de información llega a su destino de manera exitosa pero el emisor no recibe la confirmación del mismo. El empleo de ACK es parte del diseño del protocolo IEEE 802.15.4, no inherente a las WSN, y evidencia bajo desempeño ante el aumento de la densidad de nodos. Nótese que la red muestra un mejor desempeño en cuanto a *goodput* a nivel de radio que a nivel MAC, lo cual evidencia lo explicado antes.

El efecto negativo sobre las capas de radio y MAC provocadas por el aumento de D_N , tiene sus consecuencias en la latencia de los paquetes dentro de la red. Aunque muchas aplicaciones de WSN no tienen estrictos requerimientos de latencia, es importante conocer el comportamiento de este aspecto del desempeño de la red, relevante en el diseño y despliegue de una WSN para determinada aplicación. La figura 3–9 muestra el comportamiento del protocolo IEEE 802.15.4 en cuanto a latencia en función de D_N .

En la figura 3–9a se muestra el promedio de la latencia para $R_p = 0,5$ paquetes/segundo, mientras que la figura 3–9b muestra el comportamiento de la latencia para $R_p = 1,0$ paquetes/segundo. Nótese que para baja carga de tráfico, la latencia dentro de la red se



(a) $R_p = 0,5$ paquetes/segundo.

(b) $R_p = 1,0$ paquetes/segundo.

Figura 3-9: Escenario 2: Latencia promedio de los paquetes.

mantiene por debajo de los 2 segundos para la mayoría de los paquetes. Sin embargo, cuando $R_p \geq 1,0$ paquetes/segundo, el comportamiento de la latencia presenta un punto crítico a partir del cual la latencia crece abruptamente hasta que la mayoría de los paquetes llegan con 10 segundos o más de latencia. En la figura 3-9b, se muestra que este punto se ubica en $D_N = 0,078$ nodos/m² cuando $R_p = 1,0$ paquetes/segundo. El punto crítico de D_N depende de la carga de tráfico pues estas dos magnitudes están fuertemente relacionadas, y ambas tienen efecto en el desempeño de la red. El punto crítico de latencia se encuentra en valores más bajos de D_N a medida que crece R_p .

Debido al empeoramiento del desempeño de la red, la eficiencia energética del protocolo se reduce a medida que aumenta D_N . En la figura 3-10 se muestra el comportamiento del consumo promedio de energía de cada nodo dentro de la red, el cual aumenta proporcionalmente a D_N . El comportamiento de las gráficas para diferentes razones de paquetes demuestra que este efecto no se debe a la razón de generación de paquetes de los nodos sino al aumento de D_N . Este resultado confirma la conclusión obtenida del análisis del consumo de energía de los nodos para diferentes razones de generación de paquetes obtenido en el escenario anterior.

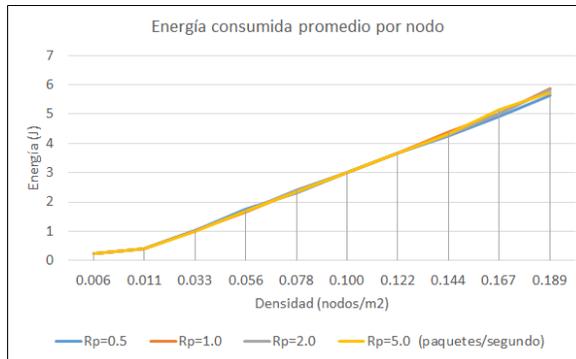


Figura 3-10: Escenario 2: Consumo de energía promedio de cada nodo.

Los resultados de la simulación de este escenario demuestran que el aumento de D_N tiene un efecto notable en el desempeño del protocolo IEEE 802.15.4 pues el incremento de la contención por el medio hace que crezca la interferencia interna de la red y la cantidad de

colisiones que ocurren dentro de la misma. Esto trae como consecuencia que se reduzca el *goodput* de la red y la eficiencia energética del protocolo. El efecto negativo del empleo de ACK sobre el desempeño a nivel MAC es una característica del protocolo IEEE 802.15.4 evidenciada en la simulación del presente escenario.

3.3. Escenario 3: Niveles de RDC

El objetivo de la simulación de este escenario es describir el efecto de la variación del RDC de los nodos sobre el desempeño del protocolo y de la red. En los resultados de la simulación se demuestra que el *throughput* de la red disminuye considerablemente con la disminución del RDC de los nodos, para cada valor de razón de generación de paquetes. La figura 3–11 muestra la cantidad promedio de paquetes enviados a nivel de radio (3–11a) y los recibidos a nivel de aplicación (3–11b), por cada nodo. Nótese la pendiente decreciente de las gráficas para valores de RDC menores que 12.5%. Esto se debe a que los nodos pasan una parte considerable del tiempo en modo inactivo y, por tanto, las oportunidades de enviar paquetes se reducen para bajos niveles de RDC.

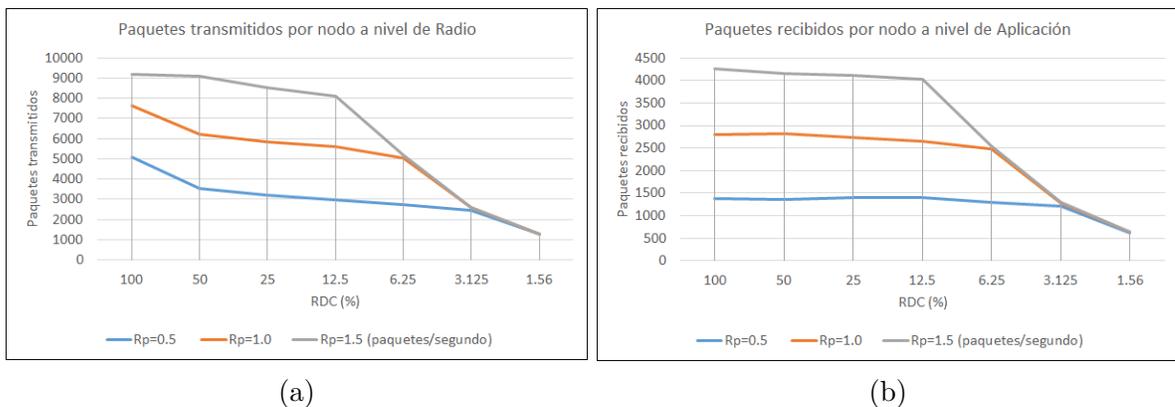
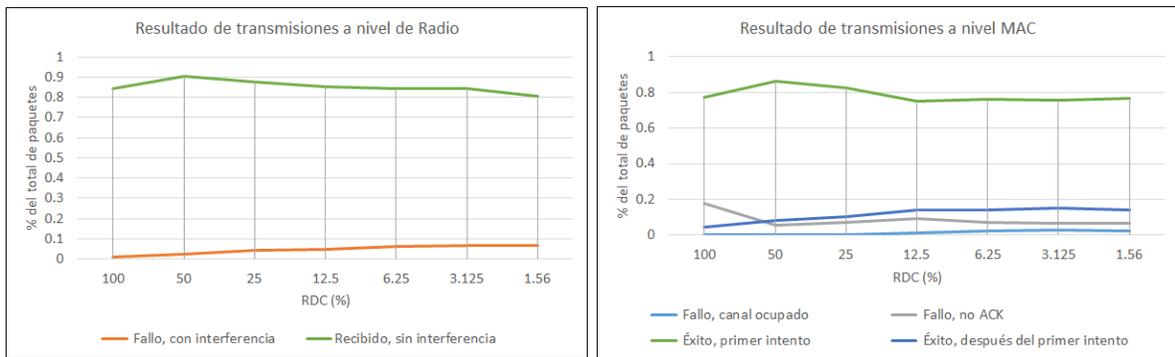


Figura 3–11: Escenario 3: Paquetes transmitidos promedio por nodo a nivel de Radio (a) y recibidos a nivel de Aplicación por cada nodo (b).

Como se muestra en la figura 3–12a, a nivel de radio no se evidencian diferencias significativas en el desempeño de la red. Sin embargo, cabe destacar que existe un ligero aumento de la interferencia interna evidenciado por el incremento de los fallos en la recepción de paquetes debido a interferencia y la disminución de los paquetes que se reciben sin interferencia. La causa del aumento de la interferencia interna es el aumento de la contención en la red debido a que los nodos disponen de menos períodos activos para transmitir las mismas cantidades de paquetes por unidad de tiempo. Este aumento de la contención en cada período activo tiene como repercusión a nivel MAC que los nodos fracasen más a menudo en el primer intento de enviar un paquete, ya sea por no recibir el ACK o por no conseguir acceso al canal. Este efecto se evidencia en la figura 3–12b, donde se puede apreciar una disminución del porcentaje de transmisiones exitosas en el primer intento y un incremento del porcentaje de paquetes que se logran enviar en intentos posteriores. En

ambos casos la disminución del *goodput* no es muy acentuada pues el aumento de la congestión está dado por la cantidad de paquetes en espera para ser transmitidos, no por el incremento en la cantidad de nodos, lo cual hace que el efecto sea menos significativo.



(a) Desglose de transferencias a nivel de Radio. (b) Desglose de transferencias a nivel MAC.
 Figura 3–12: Escenario 3: Comportamiento de la red a nivel de Radio y a nivel MAC.

El objetivo principal del RDC es reducir el consumo de energía en los nodos por unidad de tiempo. Por tanto, es indispensable incluir en este análisis el comportamiento de la relación entre RDC y consumo de energía. En la figura 3–13 se evidencia que el consumo de energía disminuye junto con el RDC. Sin embargo, es importante destacar que cuando el RDC se hace muy bajo el desempeño de la red se ve afectado y, por tanto, comienzan a ocurrir fallos en la comunicación que provocan retransmisiones de mensajes, lo cual mantiene casi invariable el consumo de energía para $RDC \leq 6,25\%$. Nótese que el comportamiento es el mismo para cada valor de carga de tráfico simulado.

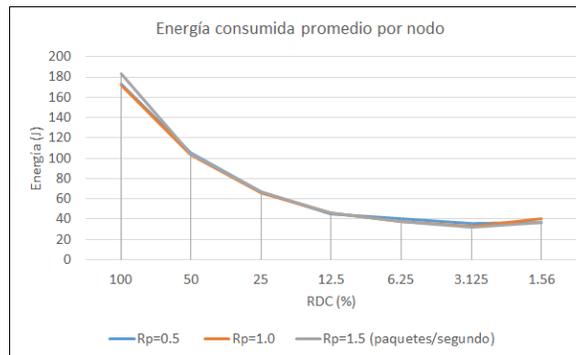


Figura 3–13: Escenario 3: Consumo de energía promedio de cada nodo.

La ventaja inherente al empleo de RDC, el ahorro de energía, tiene como contrapartida un aumento de la latencia dentro de la red debido a los largos períodos de inactividad de los nodos. En la figura 3–14 se ilustra el desempeño de la red en cuanto a latencia. La figura contiene las gráficas de porcentaje de paquetes que llegan dentro de determinados rangos de latencia en función del RDC. Al igual que en las secciones anteriores, no se incluyen las gráficas para intervalos intermedios de latencia pues no añaden información relevante a la figura. Sin embargo, nótese que el valor de RDC de 12.5% constituye un punto crítico dentro de la gráfica pues para valores superiores a 12.5% la mayoría de los paquetes llega

con latencias inferiores a los 2 segundos. Cuando el RDC es menor que 12.5 % la latencia aumenta drásticamente y la mayoría de los paquetes llega con una latencia superior a los 10 segundos.

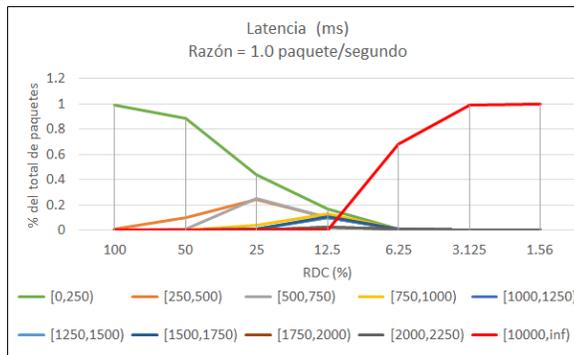


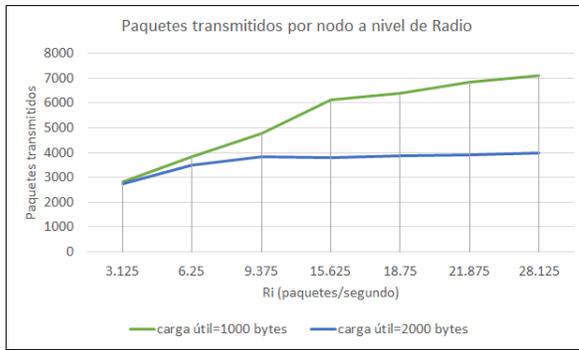
Figura 3–14: Escenario 3: Latencia promedio de los paquetes.

En este escenario se ha demostrado el efecto del RDC en el desempeño de la red y en el consumo energético de los nodos. El *goodput* de la red no se degrada notablemente a nivel de radio o a nivel MAC, sin embargo el *throughput* de la red disminuye significativamente con el aumento del RDC, sobre todo para niveles de $RDC \leq 12,5\%$. Además, se verifica que el ahorro de energía en los nodos trae como consecuencia un aumento significativo de la latencia a nivel de aplicación.

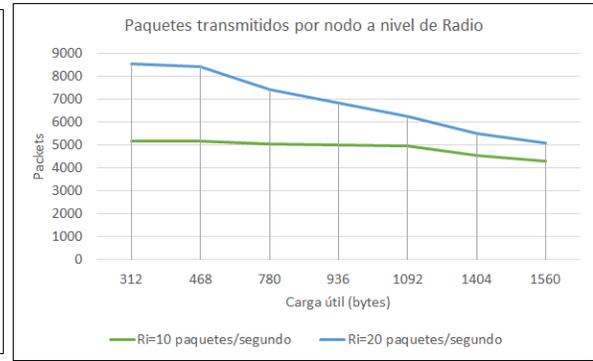
3.4. Escenario 4: Interferencia

A continuación se muestran y comentan los resultados de la simulación de los escenarios 4.1 y 4.2, a través de los cuales se pretende describir el desempeño del protocolo MAC IEEE 802.15.4 ante diferentes niveles de interferencia externa. En cada uno de estos dos escenarios se varía un parámetro que incide en la interferencia externa sufrida por la red WSN bajo estudio: razón de generación de paquetes (R_I) y carga de los paquetes (S_I) de los nodos de la red interferente. Sin embargo, se han agrupado en una misma sección de este capítulo porque los dos parámetros utilizados para variar la interferencia externa influyen de manera combinada en el desempeño de la red y del protocolo MAC IEEE 802.15.4. Para ejemplificar lo anterior, se muestran en la figura 3–15 las gráficas correspondiente a la cantidad de paquetes transmitidos a nivel de radio por los nodos en ambos escenarios.

Nótese que en la figura 3–15b la cantidad de paquetes que se transmiten a nivel de radio se mantiene constante para cada valor de R_I cuando la carga útil de los paquetes de la red interferente es baja, pero disminuye notablemente cuando sobrepasa cierto umbral. Para $R_I = 10$ el punto de cambio se encuentra en $S_I = 1092 \text{ bytes}$, mientras que para $R_I = 20$ el punto de cambio se encuentra en $S_I = 468 \text{ bytes}$, demostrándose la interrelación entre el efecto provocado por ambos parámetros. La figura 3–15a demuestra que el problema aparece con razones de generación de paquetes menores cuando la carga útil es más grande, confirmando la observación anterior.



(a) Escenario 4.1.



(b) Escenario 4.2.

Figura 3–15: Escenario 4: Paquetes transmitidos promedio por nodo a nivel de Radio.

Un efecto similar ocurre con la cantidad de paquetes recibidos a nivel de aplicación, la cual decrece a medida que aumenta S_I , haciéndolo más abruptamente a medida que aumenta R_I . Este comportamiento se muestra en la figura 3–16 correspondiente al escenario 4.2.

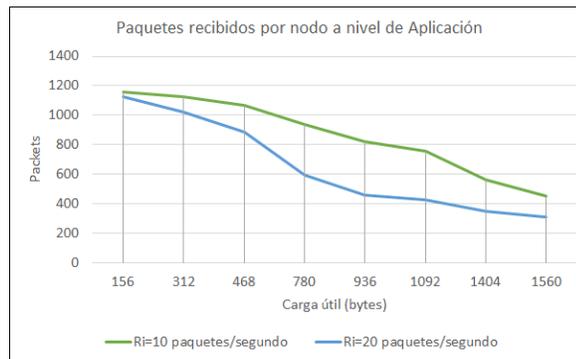
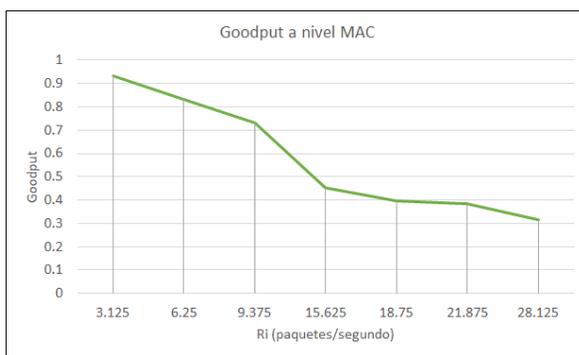
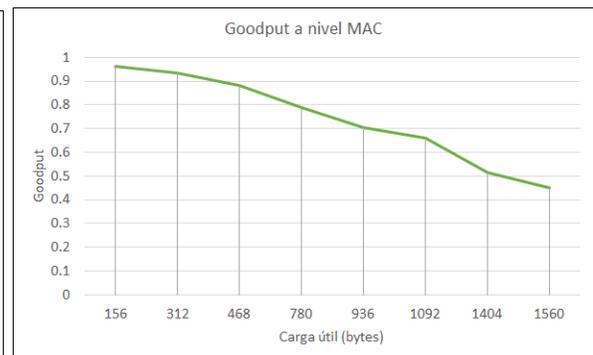


Figura 3–16: Escenario 4: Paquetes recibidos promedio a nivel de aplicación por cada nodo. Escenario 4.2.

El incremento en los niveles de interferencia externa tiene un efecto notable en el desempeño a nivel MAC pues provoca un aumento en la cantidad de paquetes que fallan a nivel de radio por causas de interferencia. La figura 3–17 muestra la caída en el *goodput* de la red provocada por el aumento de R_I (3–17a) y S_I (3–17b) debido al incremento de los fallos en las transmisiones a nivel MAC.



(a) Escenario 4.1.



(b) Escenario 4.2.

Figura 3–17: Escenario 4: *Goodput* de la red a nivel MAC.

Para analizar las causas de la disminución en el *goodput* de la red a nivel MAC, la figura 3–18 muestra el desglose de las transferencias a nivel MAC según el resultado alcanzado con cada una de ellas. Las gráficas evidencian que la cantidad de paquetes transmitidos exitosamente disminuye a medida que crecen R_I (3–18a) y S_I (3–18b). Sin embargo, el aumento del porcentaje de transmisiones fallidas no está relacionado solamente con el desempeño a nivel de radio sino que está fuertemente influenciado por el mecanismo CSMA/CA y el empleo de ACK. Evidencia de lo anterior es el incremento de transmisiones fallidas por canal ocupado y por no recibo del ACK. El problema de no recibo del ACK se agrava por la interferencia externa e implica que un porcentaje considerable de los paquetes llega a su destino pero no se recibe el ACK, haciendo fracasar la transmisión completa.

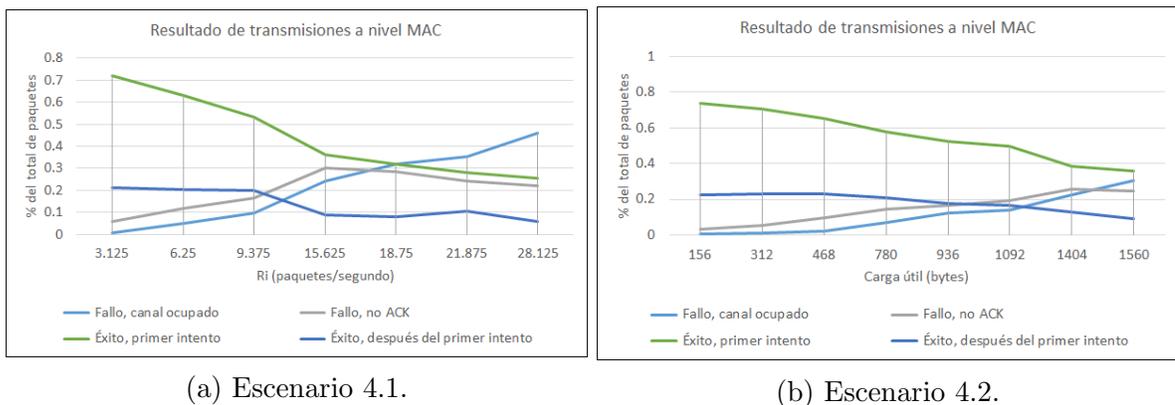
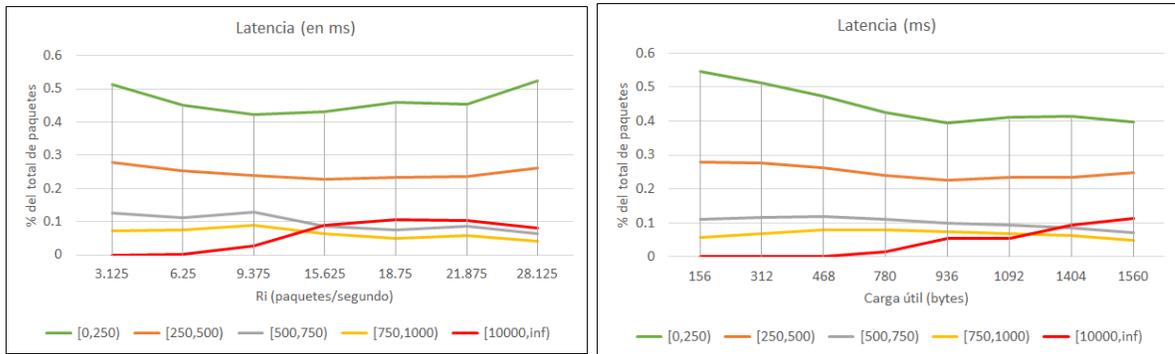


Figura 3–18: Escenario 4: Desglose de transferencias en la red a nivel MAC.

En cuanto a la latencia de la red, no se evidencia un efecto considerable debido al aumento de la interferencia externa, lo cual es un aspecto positivo a considerar sobre el protocolo MAC IEEE 802.15.4. La figura 3–19 muestra el comportamiento de la latencia en ambos escenarios. Nótese que el porcentaje de paquetes que llega con más de 10 segundos de latencia aumenta ligeramente a partir de niveles medios y altos de interferencia externa. La causa de este comportamiento es que los paquetes que fallan no son tenidos en cuenta dentro de la latencia y con el aumento de la interferencia se descartan más paquetes pero la mayoría de los que son transmitidos exitosamente llegan a su destino con baja latencia a nivel de aplicación.

Los resultados de la simulación de este escenario muestran que el consumo de energía de los nodos WSN se mantiene prácticamente constante para valores bajos de R_I (figura 3–20a) y de S_I (figura 3–20b). Cuando $R_I \geq 9,375$ paquetes/segundo y $S_I \geq 780$ bytes el consumo de energía de la red aumenta notablemente, lo cual es un efecto asociado a la caída en el desempeño de la red.

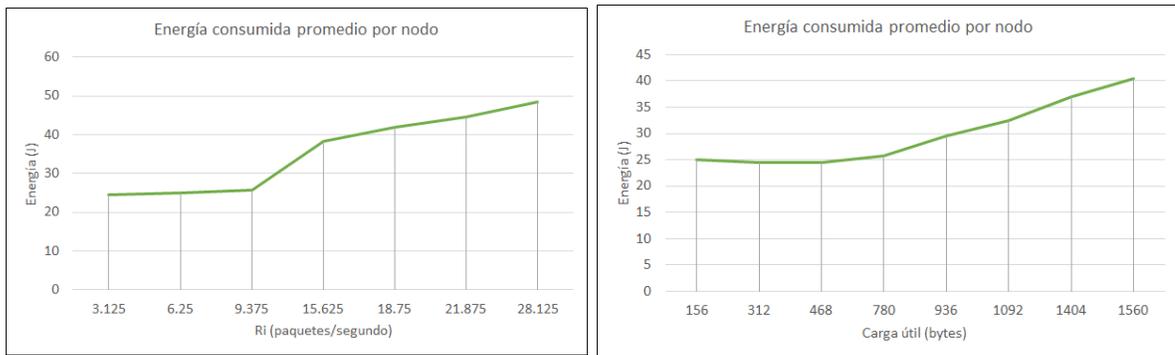
La respuesta del protocolo MAC IEEE 802.15.4 ante diferentes niveles de interferencia externa se considera negativa pues el uso de ACK para confirmar el recibo de los mensajes hace que el aumento en los niveles de interferencia provoque el fracaso de transmisiones en las cuales el mensaje llega a su destinatario pero se interpreta lo contrario debido al no



(a) Escenario 4.1.

(b) Escenario 4.2.

Figura 3–19: Escenario 4: Latencia promedio de los paquetes.



(a) Escenario 4.1.

(b) Escenario 4.2.

Figura 3–20: Escenario 4: Consumo de energía promedio de cada nodo.

recibo del ACK. Además, el empleo de CSMA/CA hace que los nodos no puedan acceder al medio cuando perciben la señal interferente en el canal de comunicaciones. Esta caída en el desempeño de la red provoca un aumento considerable del consumo de energía para niveles medios y altos de interferencia externa. Por otro lado, la latencia dentro de la red mantiene valores aceptables a pesar del incremento de los niveles de interferencia externa sobre la red WSN.

3.5. Consideraciones finales del capítulo

En este capítulo se ha realizado la discusión de los resultados obtenidos de la simulación de los escenarios implementados en la presente investigación. Estos resultados permiten concluir que el aumento de la carga de tráfico generada por los nodos influye negativamente en el desempeño de la red y del protocolo MAC, estableciendo un punto crítico por encima del cual la red se satura y aumenta considerablemente el porcentaje de transferencias fallidas y la latencia dentro de la red. Un fenómeno similar se demuestra cuando se aumenta la densidad de nodos pues induce un incremento de la interferencia interna conduciendo a la reducción del *goodput* del protocolo y de la eficiencia energética de la red. Con el escenario 3 se demuestra que la disminución del RDC implica un ahorro significativo de energía en los nodos a cambio de incrementar la latencia y disminuir el *throughput* de la red. La respuesta del protocolo MAC IEEE 802.15.4 ante diferentes niveles de interferencia

externa revela un comportamiento positivo en cuanto a latencia pero deficiente en cuanto al *goodput* de la red, por causa del mecanismo de ACK del protocolo MAC, y al consumo de energía .

De manera general, el rendimiento del protocolo IEEE 802.15.4 demuestra un buen desempeño ante niveles bajos de carga de tráfico, densidad de nodos e interferencia externa, expresado en el mantenimiento de un buen *throughput* y niveles aceptables de latencia y consumo energético en la red. Sin embargo, se demuestra que cuando la red demanda valores considerables de estos parámetros, el rendimiento del protocolo disminuye considerablemente. Altos niveles de carga de tráfico provocan un aumento de la contención y de la interferencia interna que provocan que disminuya el *goodput* de la red y se incremente abruptamente la latencia. Por otro lado, la interferencia externa tiene un efecto variado sobre el desempeño del protocolo pues provoca que empeore el *goodput* de la red y el consumo energético pero mantiene niveles aceptables de latencia en el rango de interferencia externa simulado.

El protocolo presenta como deficiencias fundamentales la disminución de su desempeño cuando aumentan los niveles de contención por el medio, lo cual es inherente al mecanismo CSMA/CA, y el incremento del porcentaje de transmisiones fallidas provocado por el empleo de comunicaciones basadas en ACK. En cuanto a este último aspecto vale destacar que la transmisión de los ACK usando ALOHA provoca la retransmisión innecesaria de paquetes de manera frecuente debido a fallos en la transmisión del ACK, no en la transferencia del paquete de datos. Una posible solución a este problema es enviar los ACK usando el mecanismo CSMA/CA pero dando mayor prioridad a los paquetes ACK que a los paquetes de datos.

CONCLUSIONES

De la realización de la presente investigación se extraen las siguientes conclusiones finales:

- Las WSN tienen características específicas en cuanto a disponibilidad de energía y recursos computacionales y de radio, patrones de tráfico, e inestabilidad de los enlaces, que las diferencian notablemente de otras redes inalámbricas. Estas características tienen un impacto significativo en la capa MAC por ser la responsable de controlar la interfaz de radio que es el componente que consume la mayor parte de la energía de los nodos. Los protocolos MAC para WSN tienen que ser computacionalmente ligeros, eficientes desde el punto de vista energético y mantener un buen desempeño en escenarios de interferencia proveniente de otras redes, reduciendo al mínimo posible las causas de desperdicio adicional de energía.
- El estándar IEEE 802.15.4 tiene características que lo hacen adecuado para su aplicación en WSN por definir redes de baja tasa de transmisión y baja potencia que coinciden con las características de las WSN. El protocolo MAC IEEE 802.15.4 cumple con los requerimientos necesarios para su despliegue en WSN pues incluye características como RDC, operación autónoma de los nodos y posibilidades de calidad de servicio básicas.
- El modelo de simulación y los escenarios diseñados en base a ese modelo permiten estudiar el desempeño del protocolo MAC IEEE 802.15.4 bajo condiciones variables de carga de tráfico, densidad de la red, niveles de RDC e interferencia externa. La estructura modular de Castalia permite que la definición del modelo y los escenarios de simulación a partir de los parámetros de los diferentes módulos exprese claramente la configuración de la red simulada en cada caso.
- Los resultados de las simulaciones demuestran que el desempeño de la red es afectado severamente por el aumento de la carga de tráfico, densidad de nodos e interferencia externa, provocando un incremento significativo del porcentaje de transmisiones fallidas, la latencia y el consumo energético de los nodos. Especial mención merece el hecho de que la variación de la razón de generación de paquetes de los nodos no afecta la eficiencia energética de los nodos, lo cual constituye una característica específica de las WSN. La disminución del valor de RDC en los nodos demuestra el efecto esperado de reducir significativamente el consumo de energía en los nodos a cambio de un aumento considerable de la latencia dentro de la red y la disminución del *throughput*. El efecto de la interferencia externa en el desempeño del protocolo es

una disminución considerable en el *goodput* de la red a nivel MAC, con incremento del consumo energético y manteniendo niveles aceptables de latencia.

- El análisis de desempeño realizado al protocolo MAC IEEE 802.15.4 pone de manifiesto que el mecanismo CSMA/CA impone limitaciones considerables a la red debido a su bajo desempeño con el aumento de la contención. Además, los escenarios simulados evidencian que el mecanismo de ACK utilizado en el protocolo influye negativamente en su desempeño cuando aumentan los niveles de carga de tráfico, densidad de nodos, RDC e interferencia externa. Este análisis es el elemento que culmina la investigación, haciendo evidente el cumplimiento del objetivo general propuesto para la misma.

RECOMENDACIONES

Con el objetivo de profundizar en el tema de las WSN y, específicamente, en el estándar IEEE 802.15.4, los autores proponen las siguientes recomendaciones para investigaciones futuras:

1. Extender la presente investigación a través del análisis de desempeño del protocolo MAC IEEE 802.15.4 en dispositivos reales de WSN.
2. Comparar el desempeño del protocolo MAC IEEE 802.15.4 con otros protocolos MAC para WSN del estado del arte.
3. Realizar un estudio de coexistencia del protocolo MAC IEEE 802.15.4 con redes IEEE 802.11 y dispositivos Bluetooth.
4. Implementar en Castalia las funcionalidades del estándar IEEE 802.15.4 que aun no se encuentran disponibles en dicho simulador.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey,” *Computer networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.
- [2] M. Avvenuti, P. Corsini, P. Masci, and A. Vecchio, “Increasing the efficiency of preamble sampling protocols for wireless sensor networks,” in *Proceedings of the First Mobile Computing and Wireless Communication International Conference, MCWC 2006*. IEEE, 2006, pp. 117–122.
- [3] A. Bachir, D. Barthel, M. Heusse, and A. Duda, “Micro-frame preamble mac for multihop wireless sensor networks,” in *IEEE International Conference on Communications, ICC 2006.*, vol. 7. IEEE, 2006, pp. 3365–3370.
- [4] J. Borms, K. Steenhaut, and B. Lemmens, “Low-overhead dynamic multi-channel mac for wireless sensor networks,” in *Wireless Sensor Networks*. Springer, 2010, pp. 81–96.
- [5] A. Boulis, “Castalia user manual,” [Online] Disponible: <http://castalia.npc.nicta.com.au/pdfs/Castalia-User Manual.pdf>, 2009.
- [6] X. Chang, “Network simulations with opnet,” in *Proceedings of the 31st Conference on Winter Simulation: Simulation—a bridge to the future*, vol. 1. ACM, 1999, pp. 307–314.
- [7] S. Chatterjea, L. Van Hoesel, and P. Havinga, “Ai-lmac: An adaptive, information-centric and lightweight mac protocol for wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 2004 Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*. IEEE, 2004, pp. 381–388.
- [8] Crossbow Technology Inc., “Mica2 Wireless Measurement System datasheet,” *Document Part Number: 6020-0042-04*, 2010.
- [9] Crossbow Technology Inc., “MicaZ Wireless Measurement System datasheet,” *Document Part Number: 6020-0060-04 Rev A*, 2010.
- [10] Crossbow Technology Inc., “Imote2 datasheet. high-performance wireless sensor network node,” 2014.
- [11] A. De Domenico, E. C. Strinati, and M. Di Benedetto, “A survey on mac strategies for cognitive radio networks,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 14, no. 1, pp. 21–44, 2012.
- [12] S. Du, A. K. Saha, and D. B. Johnson, “Rmac: A routing-enhanced duty-cycle mac protocol for wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications, Infocom 2007*. IEEE, 2007, pp. 1478–1486.

- [13] J. M. Gilbert and F. Balouchi, "Comparison of energy harvesting systems for wireless sensor networks," *International Journal of Automation and Computing*, vol. 5, no. 4, pp. 334–347, 2008.
- [14] S. Gobriel, D. Mosse, and R. Cleric, "Tdma-asap: Sensor network tdma scheduling with adaptive slot-stealing and parallelism," in *Proceedings of the 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems, ICDCS 2009*. IEEE, 2009, pp. 458–465.
- [15] G. P. Halkes and K. Langendoen, "Crankshaft: An energy-efficient mac-protocol for dense wireless sensor networks," in *Wireless Sensor Networks*. Springer, 2007, pp. 228–244.
- [16] I. Howitt and J. A. Gutierrez, "Ieee 802.15. 4 low rate-wireless personal area network coexistence issues," in *Proceedings of the 2003 IEEE Wireless Communications and Networking, WCNC 2003.*, vol. 3. IEEE, 2003, pp. 1481–1486.
- [17] P. Huang, L. Xiao, S. Soltani, M. W. Mutka, and N. Xi, "The evolution of mac protocols in wireless sensor networks: A survey," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 15, no. 1, pp. 101–120, 2013.
- [18] IEEE Std., "Local and metropolitan area networks - Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) IEEE Computer Society," 2011.
- [19] O. D. Incel, L. van Hoesel, P. Jansen, and P. Havinga, "Mc-lmac: A multi-channel mac protocol for wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 9, no. 1, pp. 73–94, 2011.
- [20] B. Jang, J. B. Lim, and M. L. Sichitiu, "As-mac: An asynchronous scheduled mac protocol for wireless sensor networks," in *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems, MASS 2008*. IEEE, 2008, pp. 434–441.
- [21] J. M. Kahn, R. H. Katz, and K. S. Pister, "Next century challenges: mobile networking for "smart dust"," in *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*. ACM, 1999, pp. 271–278.
- [22] Y. Kim, H. Shin, and H. Cha, "Y-mac: An energy-efficient multi-channel mac protocol for dense wireless sensor networks," in *Proceedings of the 7th international conference on Information processing in sensor networks*. IEEE Computer Society, 2008, pp. 53–63.
- [23] M. Kohvakka, M. Kuorilehto, M. Hännikäinen, and T. D. Hämäläinen, "Performance analysis of ieee 802.15. 4 and zigbee for large-scale wireless sensor network applications," in *Proceedings of the 3rd ACM international workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor and ubiquitous networks*. ACM, 2006, pp. 48–57.
- [24] A. Koubaa, M. Alves, and E. Tovar, "A comprehensive simulation study of slotted csma/ca for ieee 802.15. 4 wireless sensor networks," *IEEE WFCS*, vol. 6, pp. 63–70, 2006.

- [25] K. Langendoen, “Medium access control in wireless sensor networks,” *Medium access control in wireless networks*, vol. 2, pp. 535–560, 2008.
- [26] C.-J. M. Liang, A. Terzis *et al.*, “Koala: Ultra-low power data retrieval in wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 7th international conference on Information processing in sensor networks*. IEEE Computer Society, 2008, pp. 421–432.
- [27] S. Lim, Y. Ji, J. Cho, and S. An, “An ultra low power medium access control protocol with the divided preamble sampling,” in *Ubiquitous Computing Systems*. Springer, 2006, pp. 210–224.
- [28] E.-Y. Lin, J. M. Rabaey, and A. Wolisz, “Power-efficient rendez-vous schemes for dense wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Communications*, vol. 7. IEEE, 2004, pp. 3769–3776.
- [29] G. Lu, B. Krishnamachari, and C. S. Raghavendra, “An adaptive energy-efficient and low-latency mac for data gathering in wireless sensor networks,” in *Parallel and Distributed Processing Symposium, 2004. Proceedings. 18th International*. IEEE, 2004, p. 224.
- [30] G. Lu, B. Krishnamachari, and C. S. Raghavendra, “Performance evaluation of the ieee 802.15. 4 mac for low-rate low-power wireless networks,” in *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Performance, Computing, and Communications*. IEEE, 2004, pp. 701–706.
- [31] Moteiv Corporation, “Tmote Sky: Ultra low power IEEE 802.15.4 compliant wireless sensor module,” pp. 1–28, 2006.
- [32] NS, *Network Simulator*. Disponible: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, 2010.
- [33] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, “Versatile low power media access for wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*. ACM, 2004, pp. 95–107.
- [34] Qualnet, “Qualnet network simulator. scalable network technologies,” [Online] Disponible: <http://www.qualnet.com>, 2011.
- [35] V. Rajendran, K. Obraczka, and J. J. Garcia-Luna-Aceves, “Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks,” *Wireless Networks*, vol. 12, no. 1, pp. 63–78, 2006.
- [36] A. Rastegarnia and V. Solouk, “Performance evaluation of castalia wireless sensor network simulator,” in *Proceedings of the 34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing, TSP 2011*. IEEE, 2011, pp. 111–115.
- [37] I. Rhee, A. Warrier, M. Aia, J. Min, and M. L. Sichitiu, “Z-mac: a hybrid mac for wireless sensor networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 16, no. 3, pp. 511–524, 2008.
- [38] C. P. Singh, O. Vyas, and M. K. Tiwari, “A survey of simulation in sensor networks,” in *Proceedings of the 2008 International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control & Automation*. IEEE, 2008, pp. 867–872.

- [39] W.-Z. Song, R. Huang, B. Shirazi, and R. LaHusen, “Treemac: Localized tdma mac protocol for real-time high-data-rate sensor networks,” *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 5, no. 6, pp. 750–765, 2009.
- [40] Y. Sun, S. Du, O. Gurewitz, and D. B. Johnson, “Dw-mac: a low latency, energy efficient demand-wakeup mac protocol for wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 9th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*. ACM, 2008, pp. 53–62.
- [41] Y. Sun, O. Gurewitz, and D. B. Johnson, “Ri-mac: a receiver-initiated asynchronous duty cycle mac protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems*. ACM, 2008, pp. 1–14.
- [42] Texas Instruments, “Cc1000: Single chip very low power rf transceiver datasheet,” *Reference SWRS048. Rev A*, 2007.
- [43] Texas Instruments, “Cc2420, single-chip 2.4 ghz ieee 802.15.4 compliant and zigbee (tm) ready rf transceiver datasheet,” <http://focus.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>, 2007.
- [44] T. Van Dam and K. Langendoen, “An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*. ACM, 2003, pp. 171–180.
- [45] A. Varga, “The omnet++ discrete event simulation system,” in *Proceedings of the European Simulation Multiconference, ESM 2001*, vol. 9, 2001, p. 185.
- [46] A. Varga, “Omnet++ user guide,” *Disponibile: <http://www.omnetpp.org/documentation>*, 2011.
- [47] N. Vasanthi and S. Annadurai, “Energy efficient sleep schedule for achieving minimum latency in query based sensor networks,” in *IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing, 2006.*, vol. 2. IEEE, 2006, pp. 214–219.
- [48] E. Weingartner, H. Vom Lehn, and K. Wehrle, “A performance comparison of recent network simulators,” in *IEEE International Conference on Communications, ICC’09*. IEEE, 2009, pp. 1–5.
- [49] K.-J. Wong and D. Arvind, “Speckmac: low-power decentralised mac protocols for low data rate transmissions in specknets,” in *Proceedings of the 2nd international workshop on Multi-hop ad hoc networks: from theory to reality*. ACM, 2006, pp. 71–78.
- [50] Y. Wu, J. A. Stankovic, T. He, and S. Lin, “Realistic and efficient multi-channel communications in wireless sensor networks,” in *IEEE Conference on Computer Communications, INFOCOM 2008*. IEEE, 2008.
- [51] X. Xian, W. Shi, and H. Huang, “Comparison of omnet++ and other simulator for wsn simulation,” in *Proceedings of the 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics*

- and Applications, ICIEA 2008*. IEEE, 2008, pp. 1439–1443.
- [52] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, “An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, vol. 3. IEEE, 2002, pp. 1567–1576.
- [53] X. Zeng, R. Bagrodia, and M. Gerla, “Glomosim: a library for parallel simulation of large-scale wireless networks,” in *Proceedings of the 12th Workshop on Parallel and Distributed Simulation, PADS 98*. IEEE, 1998, pp. 154–161.
- [54] T. Zheng, S. Radhakrishnan, and V. Sarangan, “Pmac: an adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Parallel and Distributed Processing Symposium*. IEEE, 2005, pp. 8–pp.
- [55] G. Zhou, C. Huang, T. Yan, T. He, J. A. Stankovic, and T. F. Abdelzaher, “Mmsn: Multi-frequency media access control for wireless sensor networks.” in *Infocom 2006*, vol. 6, 2006, pp. 1–13.

ANEXO A

ARCHIVOS DE CONFIGURACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN.

A.1. Escenario 1: Carga de Tráfico

```
[General]
include ../Parameters/Castalia.ini
sim-time-limit = 1201s
SN.numNodes = ${num_nodes=5,10,15,20}
SN.field_x = 30
SN.field_y = 30
SN.deployment = "uniform"
SN.node[0].xCoord = 15
SN.node[0].yCoord = 15

SN.node[*].Communication.Radio.RadioParametersFile = "../Parameters/Radio/CC2420.txt"
SN.node[*].Communication.Radio.symbolsForRSSI = 16
SN.node[*].Communication.Radio.TxOutputPower = "0dBm"
SN.node[*].ResourceManager.baselineNodePower = 0
SN.node[*].ApplicationName = "ThroughputTest"
SN.node[*].Application.startupDelay = 1
SN.node[0].Application.latencyHistogramMax = 5000
SN.node[0].Application.latencyHistogramBuckets = 20
SN.node[*].Communication.MACProtocolName = "Mac802154"
SN.node[0].Communication.MAC.isFFD = true
SN.node[0].Communication.MAC.isPANCoordinator = true
SN.node[*].Communication.MAC.phyDataRate = 250
SN.node[*].Communication.MAC.phyBitsPerSymbol = 4
SN.node[*].Communication.MAC.macMaxPacketSize = 200
SN.node[*].Application.packet_rate = ${rate=0.25,0.5,0.75,1,1.5,2,2.5,3,4,5,6,7}
```

A.2. Escenario 2: Densidad de Nodos

```
[General]
include ../Parameters/Castalia.ini
sim-time-limit = 301s
SN.numNodes = ${num_nodes=2,5,10,30,50,70,90,110,130,150,170}
SN.field_x = 30
SN.field_y = 30
SN.deployment = "uniform"
SN.node[0].xCoord = 15
SN.node[0].yCoord = 15

SN.node[*].Communication.Radio.RadioParametersFile = "../Parameters/Radio/CC2420.txt"
SN.node[*].Communication.Radio.symbolsForRSSI = 16
SN.node[*].Communication.Radio.TxOutputPower = "0dBm"
SN.node[*].ResourceManager.baselineNodePower = 0
SN.node[*].ApplicationName = "ThroughputTest"
SN.node[*].Application.startupDelay = 1
SN.node[0].Application.latencyHistogramMax = 10000
SN.node[0].Application.latencyHistogramBuckets = 40
SN.node[*].Communication.MACProtocolName = "Mac802154"
SN.node[0].Communication.MAC.isFFD = true
SN.node[0].Communication.MAC.isPANCoordinator = true
SN.node[*].Communication.MAC.phyDataRate = 250
SN.node[*].Communication.MAC.phyBitsPerSymbol = 4
SN.node[*].Communication.MAC.macMaxPacketSize = 200
SN.node[*].Application.packet_rate = ${rate=0.5,1.0,2.0,5}
```

A.3. Escenario 3: Niveles de RDC

```
[General]
include ../Parameters/Castalia.ini
sim-time-limit = 3001s
SN.numNodes = 10
SN.field_x = 30
SN.field_y = 30
SN.deployment = "uniform"
SN.node[0].xCoord = 15
SN.node[0].yCoord = 15

SN.node[*].Communication.Radio.RadioParametersFile = "../Parameters/Radio/CC2420.txt"
SN.node[*].Communication.Radio.symbolsForRSSI = 16
SN.node[*].Communication.Radio.TxOutputPower = "0dBm"
SN.node[*].ResourceManager.baselineNodePower = 0
SN.node[*].ApplicationName = "ThroughputTest"
SN.node[*].Application.startupDelay = 1
SN.node[0].Application.latencyHistogramMax = 10000
SN.node[0].Application.latencyHistogramBuckets = 40
SN.node[*].Communication.MACProtocolName = "Mac802154"
SN.node[0].Communication.MAC.isFFD = true
SN.node[0].Communication.MAC.isPANCoordinator = true
SN.node[*].Communication.MAC.phyDataRate = 250
SN.node[*].Communication.MAC.phyBitsPerSymbol = 4
SN.node[*].Communication.MAC.macMaxPacketSize = 200
SN.node[*].Application.packet_rate = ${rate=0.5,1,1.5}
SN.node[*].Communication.MAC.beaconOrder = ${beacon=4,5,6,7,8,9,10}
```

A.4. Escenario 4: Interferencia Externa

A.4.1. Escenario 4.1

```
[General]
include ../Parameters/Castalia.ini
sim-time-limit = 1201s
SN.field_x = 30
SN.field_y = 30
SN.numNodes = 14
SN.deployment = "uniform"
SN.node[0].xCoord = 15
SN.node[0].yCoord = 15
SN.node[10].xCoord = 7.5
SN.node[10].yCoord = 7.5
SN.node[11].xCoord = 7.5
SN.node[11].yCoord = 22.5
SN.node[12].xCoord = 22.5
SN.node[12].yCoord = 7.5
SN.node[13].xCoord = 22.5
SN.node[13].yCoord = 22.5

SN.node[*].Communication.Radio.RadioParametersFile = "../Parameters/Radio/CC2420.txt"
SN.node[*].Communication.Radio.symbolsForRSSI = 16
SN.node[0..9].Communication.Radio.TxOutputPower = "0dBm"
SN.node[10..].Communication.Radio.TxOutputPower = "-15dBm"
SN.node[*].Communication.Radio.collisionModel = 2
SN.node[*].ResourceManager.baselineNodePower = 0
SN.node[*].ApplicationName = "ThroughputTest"
SN.node[*].Application.startupDelay = 1
SN.node[0..9].Application.packet_rate = 1
SN.node[10..].Application.packet_rate = ${rate=3.125,6.25,9.375,...
...,15.625,18.75,21.875,28.125,31.25,43.75,56.25}
SN.node[10..].Application.constantDataPayload = ${payloadApp=1000,2000}
SN.node[10..].Communication.Routing.maxNetFrameSize = 2500
SN.node[10..].Communication.MAC.maxMACFrameSize = 2500
SN.node[10..].Communication.Radio.maxPhyFrameSize = 2500
SN.node[0].Application.latencyHistogramMax = 10000
SN.node[0].Application.latencyHistogramBuckets = 40
SN.wirelessChannel.onlyStaticNodes = true
SN.node[0..9].Communication.MACProtocolName = "Mac802154"
SN.node[0].Communication.MAC.isFFD = true
SN.node[0].Communication.MAC.isPANCoordinator = true
SN.node[*].Communication.MAC.phyDataRate = 250
SN.node[*].Communication.MAC.phyBitsPerSymbol = 2
SN.node[10..].Communication.Routing.maxNetFrameSize = 2500
SN.node[10..].Communication.MAC.maxMACFrameSize = 2500
SN.node[10..].Communication.Radio.maxPhyFrameSize = 2500
SN.node[10..].Communication.MACProtocolName = "TunableMAC"
SN.node[10..].Communication.MAC.listenInterval = 10
SN.node[10..].Communication.MAC.dutyCycle = 1.0
SN.node[10..].Communication.MAC.beaconIntervalFraction = 1.0
```

A.4.2. Escenario 4.2

```
[General]
include ../Parameters/Castalia.ini
sim-time-limit = 1201s
SN.field_x = 30
SN.field_y = 30
SN.numNodes = 14
SN.deployment = "uniform"
SN.node[0].xCoord = 15
SN.node[0].yCoord = 15
SN.node[10].xCoord = 7.5
SN.node[10].yCoord = 7.5
SN.node[11].xCoord = 7.5
SN.node[11].yCoord = 22.5
SN.node[12].xCoord = 22.5
SN.node[12].yCoord = 7.5
SN.node[13].xCoord = 22.5
SN.node[13].yCoord = 22.5

SN.node[*].Communication.Radio.RadioParametersFile = "../Parameters/Radio/CC2420.txt"
SN.node[*].Communication.Radio.symbolsForRSSI = 16
SN.node[0..9].Communication.Radio.TxOutputPower = "0dBm"
SN.node[10..].Communication.Radio.TxOutputPower = "-15dBm"
SN.node[*].Communication.Radio.collisionModel = 2
SN.node[*].ResourceManager.baselineNodePower = 0
SN.node[*].ApplicationName = "ThroughputTest"
SN.node[*].Application.startupDelay = 1
SN.node[10..].Application.packet_rate = ${rate=10,20}
SN.node[10..].Application.constantDataPayload = ${payloadApp=156,312,468,780,...
...,936,1092,1404,1560,2184,2808}
SN.node[10..].Communication.Routing.maxNetFrameSize = 2500
SN.node[10..].Communication.MAC.maxMACFrameSize = 2500
SN.node[10..].Communication.Radio.maxPhyFrameSize = 2500
SN.node[0].Application.latencyHistogramMax = 10000
SN.node[0].Application.latencyHistogramBuckets = 40
SN.wirelessChannel.onlyStaticNodes = true
SN.node[0..9].Communication.MACProtocolName = "Mac802154"
SN.node[0].Communication.MAC.isFFD = true
SN.node[0].Communication.MAC.isPANCoordinator = true
SN.node[*].Communication.MAC.phyDataRate = 250
SN.node[*].Communication.MAC.phyBitsPerSymbol = 2
SN.node[10..].Communication.Routing.maxNetFrameSize = 2500
SN.node[10..].Communication.MAC.maxMACFrameSize = 2500
SN.node[10..].Communication.Radio.maxPhyFrameSize = 2500
SN.node[10..].Communication.MACProtocolName = "TunableMAC"
SN.node[10..].Communication.MAC.listenInterval = 10
SN.node[10..].Communication.MAC.dutyCycle = 1.0
SN.node[10..].Communication.MAC.beaconIntervalFraction = 1.0
```

ANEXO B

VALIDEZ ESTADÍSTICA DE LOS RESULTADOS DE SIMULACIÓN

El presente anexo muestra los valores correspondientes a la validez estadística de la investigación. Los resultados aquí mostrados corresponden al error promedio expresado en porcentaje para un intervalo de confianza del 95 %. Es importante aclarar que los valores mostrados no corresponden al valor absoluto del error sino al porcentaje de la media correspondiente al error. Para aclarar este aspecto, se muestra a continuación la expresión utilizada para calcular los valores mostrados en este anexo.

$$E(\%) = z_{\frac{\alpha}{2}} * \frac{\sigma}{\sqrt{N}} * \frac{100}{\mu}$$

donde σ es la desviación estándar de la muestra, N es el número de corridas de la simulación, μ es la media de la muestra y $z_{\frac{\alpha}{2}} = 1,96$ para $\alpha = 1 - 0,95$.

Por una cuestión de espacio, en las tablas referentes a los resultados de las transmisiones a nivel de Radio y nivel MAC se utilizan siglas en las columnas cuyo significado se muestra a continuación:

- F-sI:** Fallo, sin interferencia
- F-cI:** Fallo, con interferencia
- F-noRX:** Fallo, sin estado de recepción
- R-cI:** Recibido, con interferencia
- R-sI** Recibido, sin interferencia
- F-CO:** Fallo, canal ocupado
- F-noACK:** Fallo, no ACK
- S-1er:** Éxito, primer intento
- S-no1er** Éxito, después del primer intento

B.1. Escenario 1: Carga de Tráfico

Tabla B-1: Paquetes transmitidos promedio a nivel de Radio.

| R_p | 10 nodos | 15 nodos | 20 nodos |
|-------|----------|----------|----------|
| 0.25 | 0.832 | 1.27 | 1.561 |
| 0.5 | 1.578 | 1.809 | 2.291 |
| 0.75 | 1.715 | 2.434 | 3.167 |
| 1 | 2.245 | 3.182 | 4.053 |
| 1.5 | 3.224 | 4.476 | 5.637 |
| 2 | 3.984 | 5.492 | 7.218 |
| 2.5 | 4.882 | 6.91 | 7.73 |
| 3 | 5.809 | 7.464 | 7.83 |
| 4 | 7.208 | 7.65 | 7.887 |
| 5 | 7.37 | 7.715 | 7.893 |
| 6 | 7.451 | 7.663 | 7.947 |
| 7 | 7.645 | 7.628 | 7.975 |

Tabla B-2: Paquetes recibidos promedio a nivel de Aplicación.

| R_p | 10 nodos | 15 nodos | 20 nodos |
|-------|----------|----------|----------|
| 0.25 | 0.112 | 0.077 | 0.042 |
| 0.5 | 0.225 | 0.165 | 0.1 |
| 0.75 | 0.337 | 0.246 | 0.157 |
| 1 | 0.451 | 0.325 | 0.168 |
| 1.5 | 0.662 | 0.46 | 0.264 |
| 2 | 0.884 | 0.665 | 0.369 |
| 2.5 | 1.095 | 0.751 | 0.528 |
| 3 | 1.29 | 0.871 | 0.562 |
| 4 | 1.649 | 0.921 | 0.573 |
| 5 | 1.808 | 0.902 | 0.608 |
| 6 | 1.72 | 0.944 | 0.526 |
| 7 | 1.771 | 0.965 | 0.508 |

Tabla B-3: Resultados de las transmisiones a nivel de Radio.

| R_p | F-sI | F-cl | F-noRX | R-cl | R-sI |
|-------|-------|-------|--------|-------|--------|
| 0.25 | 0.529 | 0.148 | 0.839 | 0.068 | 3.952 |
| 0.5 | 0.964 | 0.413 | 1.701 | 0.174 | 3.96 |
| 0.75 | 1.064 | 0.73 | 1.783 | 0.325 | 4.86 |
| 1 | 1.593 | 0.809 | 3.514 | 0.334 | 6.558 |
| 1.5 | 1.591 | 1.283 | 3.752 | 0.627 | 7.912 |
| 2 | 3.26 | 1.736 | 4.697 | 0.779 | 11.04 |
| 2.5 | 3.256 | 1.828 | 4.481 | 1.059 | 11.48 |
| 3 | 2.928 | 1.915 | 5.733 | 1.027 | 11.666 |
| 4 | 2.852 | 1.945 | 5.373 | 0.929 | 11.474 |
| 5 | 3.33 | 2.49 | 5.493 | 1.221 | 11.394 |
| 6 | 2.927 | 2.323 | 5.161 | 1.144 | 11.344 |
| 7 | 3.25 | 2.227 | 4.78 | 1.183 | 10.702 |

Tabla B-4: Resultados de las transmisiones a nivel MAC.

| R_p | F-CO | F-noACK | S-1er | S-no1er |
|-------|-------|---------|-------|---------|
| 0.25 | 0.001 | 0.051 | 0.04 | 0.022 |
| 0.5 | 0.001 | 0.12 | 0.085 | 0.041 |
| 0.75 | 0.01 | 0.165 | 0.137 | 0.05 |
| 1 | 0.018 | 0.23 | 0.149 | 0.052 |
| 1.5 | 0.029 | 0.293 | 0.243 | 0.063 |
| 2 | 0.041 | 0.274 | 0.328 | 0.08 |
| 2.5 | 0.049 | 0.301 | 0.45 | 0.098 |
| 3 | 0.049 | 0.283 | 0.491 | 0.1 |
| 4 | 0.045 | 0.267 | 0.513 | 0.1 |
| 5 | 0.045 | 0.278 | 0.531 | 0.102 |
| 6 | 0.046 | 0.271 | 0.469 | 0.094 |
| 7 | 0.048 | 0.27 | 0.448 | 0.081 |

B.2. Escenario 2: Densidad de Nodos

Tabla B-5: Paquetes transmitidos promedio a nivel de Radio.

| D_N | 0,006 | 0,011 | 0,033 | 0,056 | 0,078 | 0,100 | 0,122 | 0,144 | 0,167 | 0,189 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $R_p = 0,5$ | 0.032 | 0.064 | 0.141 | 0.175 | 0.187 | 0.189 | 0.19 | 0.189 | 0.187 | 0.185 |
| $R_p = 1,0$ | 0.056 | 0.105 | 0.228 | 0.288 | 0.314 | 0.32 | 0.312 | 0.304 | 0.3 | 0.291 |
| $R_p = 2,0$ | 0.1 | 0.193 | 0.348 | 0.342 | 0.336 | 0.324 | 0.315 | 0.305 | 0.304 | 0.292 |
| $R_p = 5,0$ | 0.234 | 0.355 | 0.352 | 0.346 | 0.334 | 0.323 | 0.315 | 0.308 | 0.299 | 0.293 |

Tabla B-6: Paquetes recibidos promedio a nivel de Aplicación.

| D_N | 0,006 | 0,011 | 0,033 | 0,056 | 0,078 | 0,100 | 0,122 | 0,144 | 0,167 | 0,189 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $R_p = 0,5$ | 0.01 | 0.015 | 0.02 | 0.018 | 0.014 | 0.011 | 0.009 | 0.007 | 0.007 | 0.006 |
| $R_p = 1,0$ | 0.02 | 0.029 | 0.035 | 0.03 | 0.025 | 0.02 | 0.016 | 0.014 | 0.012 | 0.012 |
| $R_p = 2,0$ | 0.039 | 0.056 | 0.056 | 0.038 | 0.029 | 0.021 | 0.017 | 0.014 | 0.013 | 0.012 |
| $R_p = 5,0$ | 0.099 | 0.109 | 0.057 | 0.039 | 0.028 | 0.022 | 0.017 | 0.015 | 0.013 | 0.012 |

Tabla B-7: Resultados de las transmisiones a nivel de Radio.

| D_N | F-sI | F-ci | F-noRX | R-ci | R-sI |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.006 | 0.02875 | 0.0095 | 0.023 | 0.00325 | 0.312 |
| 0.011 | 0.05175 | 0.05575 | 0.06275 | 0.01675 | 0.86075 |
| 0.033 | 0.13525 | 0.40825 | 0.2145 | 0.10475 | 2.12425 |
| 0.056 | 0.17675 | 0.77575 | 0.2965 | 0.1775 | 2.559 |
| 0.078 | 0.20425 | 1.0925 | 0.359 | 0.222 | 2.56375 |
| 0.100 | 0.22225 | 1.299 | 0.421 | 0.2435 | 2.3015 |
| 0.122 | 0.22625 | 1.3275 | 0.45675 | 0.22725 | 1.9105 |
| 0.144 | 0.23925 | 1.1655 | 0.50375 | 0.1915 | 1.42675 |
| 0.167 | 0.25225 | 0.78725 | 0.5635 | 0.14575 | 0.96125 |
| 0.189 | 0.28025 | 0.45375 | 0.621 | 0.12075 | 0.74075 |

Tabla B-8: Resultados de las transmisiones a nivel MAC.

| D_N | F-CO | F-noACK | S-1er | S-no1er |
|-------|---------|---------|---------|---------|
| 0.006 | 0 | 0.008 | 0.03925 | 0.00375 |
| 0.011 | 0.001 | 0.0075 | 0.04475 | 0.00775 |
| 0.033 | 0.00725 | 0.01325 | 0.03025 | 0.012 |
| 0.056 | 0.01175 | 0.0145 | 0.0215 | 0.01 |
| 0.078 | 0.01375 | 0.015 | 0.0165 | 0.008 |
| 0.100 | 0.014 | 0.0145 | 0.01275 | 0.00625 |
| 0.122 | 0.013 | 0.01325 | 0.01025 | 0.005 |
| 0.144 | 0.01075 | 0.012 | 0.009 | 0.004 |
| 0.167 | 0.008 | 0.01025 | 0.00825 | 0.004 |
| 0.189 | 0.0065 | 0.00925 | 0.0075 | 0.00375 |

B.3. Escenario 3: Niveles de RDC

Tabla B-9: Resultados de las transmisiones a nivel MAC.

| RDC (%) | F-CO | F-noACK | S-1er | S-no1er |
|---------|-------|---------|-------|---------|
| 100 | 0.041 | 9.542 | 4.088 | 2.889 |
| 50 | 0.004 | 4.848 | 4.955 | 1.332 |
| 25 | 0.013 | 5.237 | 5.066 | 1.418 |
| 12.5 | 0.092 | 5.071 | 5.042 | 1.24 |
| 6.25 | 0.176 | 2.392 | 4.439 | 0.868 |
| 3.125 | 0.087 | 1.19 | 2.347 | 0.381 |
| 1.56 | 0.045 | 0.627 | 1.688 | 0.286 |

Tabla B-10: Energía promedio consumida por cada nodo.

| RDC (%) | 100 | 50 | 25 | 12.5 | 6.25 | 3.125 | 1.56 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $Rp = 0,5$ | 1.266 | 0.24 | 0.354 | 0.394 | 0.464 | 0.464 | 0.462 |
| $Rp = 1,0$ | 2.72 | 0.224 | 0.343 | 0.397 | 0.442 | 0.472 | 0.497 |
| $Rp = 1,5$ | 0.199 | 0.229 | 0.354 | 0.406 | 0.443 | 0.43 | 0.458 |

B.4. Escenario 4: Interferencia Externa**B.4.1. Escenario 4.1**

Tabla B-11: Paquetes transmitidos promedio a nivel de Radio.

| R_I | 3.125 | 6.25 | 9.375 | 15.625 | 18.75 | 21.875 | 28.125 |
|-------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| $S_I = 1000bytes$ | 4.083 | 4.921 | 6.63 | 10.452 | 11.666 | 13.249 | 15.988 |
| $S_I = 2000bytes$ | 3.868 | 4.484 | 6.208 | 10.438 | 9.802 | 9.927 | 10.113 |

Tabla B-12: Paquetes recibidos promedio a nivel de Aplicación.

| R_I | 3.125 | 6.25 | 9.375 | 15.625 | 18.75 | 21.875 | 28.125 |
|-------------------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|
| $S_I = 1000bytes$ | 0.167 | 0.343 | 0.664 | 1.086 | 1.231 | 1.176 | 1.219 |
| $S_I = 2000bytes$ | 0.314 | 0.791 | 1.23 | 3.635 | 4.088 | 7.704 | 5.235 |

Tabla B-13: Resultados de las transmisiones a nivel MAC.

| R_I | F-CO | F-noACK | S-1er | S-no1er |
|--------|-------|---------|-------|---------|
| 3.125 | 0.02 | 0.177 | 0.192 | 0.098 |
| 6.25 | 0.135 | 0.359 | 0.36 | 0.112 |
| 9.375 | 0.332 | 0.568 | 0.586 | 0.194 |
| 15.625 | 0.994 | 0.993 | 0.868 | 0.243 |
| 18.75 | 0.995 | 0.966 | 0.815 | 0.212 |
| 21.875 | 1.054 | 0.919 | 0.86 | 0.279 |
| 28.125 | 1.213 | 0.996 | 0.908 | 0.21 |

Tabla B-14: Energía promedio consumida por cada nodo.

| R_I | 3.125 | 6.25 | 9.375 | 15.625 | 18.75 | 21.875 | 28.125 |
|-------------------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|
| $S_I = 1000bytes$ | 0.035 | 0.033 | 0.032 | 0.032 | 0.032 | 0.032 | 0.031 |
| $S_I = 2000bytes$ | 0.034 | 0.029 | 0.032 | 0.033 | 0.035 | 0.035 | 0.034 |

B.4.2. Escenario 4.2

Tabla B-15: Paquetes transmitidos promedio a nivel de Radio.

| $S_I(\text{bytes})$ | 156 | 312 | 468 | 780 | 936 | 1092 | 1404 | 1560 |
|---------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $R_I = 10$ | 7.299 | 7.254 | 7.175 | 7.085 | 7.033 | 6.944 | 6.766 | 6.727 |
| $R_I = 20$ | 14.199 | 14.16 | 14.182 | 13.313 | 12.497 | 11.858 | 11.904 | 12.107 |

Tabla B-16: Paquetes recibidos promedio a nivel de Aplicación.

| $S_I(\text{bytes})$ | 156 | 312 | 468 | 780 | 936 | 1092 | 1404 | 1560 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| $R_I = 10$ | 0.098 | 0.178 | 0.266 | 0.517 | 0.693 | 0.78 | 0.947 | 1.007 |
| $R_I = 20$ | 0.184 | 0.354 | 0.67 | 1.14 | 1.233 | 1.28 | 1.207 | 3.262 |

Tabla B-17: Resultados de las transmisiones a nivel MAC.

| $S_I(\text{bytes})$ | F-CO | F-noACK | S-1er | S-no1er |
|---------------------|-------|---------|-------|---------|
| 156 | 0.008 | 0.108 | 0.182 | 0.099 |
| 312 | 0.026 | 0.188 | 0.259 | 0.115 |
| 468 | 0.068 | 0.285 | 0.323 | 0.12 |
| 780 | 0.235 | 0.459 | 0.488 | 0.16 |
| 936 | 0.38 | 0.58 | 0.616 | 0.19 |
| 1092 | 0.496 | 0.646 | 0.653 | 0.212 |
| 1404 | 0.726 | 0.859 | 0.76 | 0.227 |
| 1560 | 0.928 | 0.878 | 0.855 | 0.219 |

Tabla B-18: Energía promedio consumida por cada nodo.

| $S_I(\text{bytes})$ | 156 | 312 | 468 | 780 | 936 | 1092 | 1404 | 1560 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| $R_I = 10$ | 0.036 | 0.035 | 0.034 | 0.032 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.031 |
| $R_I = 20$ | 0.035 | 0.034 | 0.032 | 0.031 | 0.031 | 0.03 | 0.031 | 0.033 |