

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**Análisis de desempeño y comparación del protocolo MAC IEEE  
802.15.4 para redes de sensores inalámbricos.**

**Autor:** Jessica González Araujo

**Tutor:** MSc. Carlos Manuel García Algora

**Santa Clara**

**2015**

**"Año 57 de la Revolución"**

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



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**Análisis de desempeño y comparación del protocolo MAC IEEE  
802.15.4 para redes de sensores inalámbricos.**

**Autor:** Jessica González Araujo

([jgaraujo@uclv.edu.cu](mailto:jgaraujo@uclv.edu.cu))

**Tutor:** MSc. Carlos Manuel García Algora

([cgalgora@uclv.edu.cu](mailto:cgalgora@uclv.edu.cu))

Profesor Instructor, Dpto. de Electrónica y Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería Eléctrica.

**Santa Clara**

**2015**

**"Año 57 de la Revolución"**



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica, 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.

---

Firma del Autor

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.

---

Firma del Tutor

---

Firma del Jefe de Departamento  
donde se defiende el trabajo

---

Firma del Responsable de  
Información Científico-Técnica

*El espacio... parece extenderse sin límites... hasta que llegas al final y aparece un  
mono lanzándote barriles*

**Philip J. Fry**

## **DEDICATORIA**

*A todos los que hicieron posible este proyecto, en especial a mis padres por su  
paciencia,*

*A mi hermana, por sus sabios consejos*

*A mi esposo, sin él nada sería lo mismo*

*A mis amistades, todas aportaron algo a mi carrera*

*A los profesores, por su ejemplo*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecer de forma relevante a mi tutor, Algora, porque sin su apoyo y ayuda este proyecto no hubiese sido posible.

Por supuesto, agradecer a mi familia, en especial a mis padres y mi hermana, porque estuvieron a mi lado en todos estos años de universidad e hicieron grandes sacrificios para llegar hasta aquí.

Quisiera destacar el apoyo que he tenido de mi esposo, noches de desvelos e insomnio.

No podría dejar de mencionar a ninguna de mis amistades pues fueron víctimas al igual que yo de 5 años duros, me soportaron en los momentos más difíciles y me enseñaron a ser quien soy.

A la Universidad, la Facultad de Ingeniería Eléctrica son más una escuela, mi agradecimiento siempre por lo mucho que me han aportado como persona y como futura profesional.

## TAREA TÉCNICA

A continuación se muestran las tareas técnicas que se llevaron a cabo para dar cumplimiento a los objetivos propuestos y así seguir un orden para la realización de la presente investigación:

1. Revisión bibliográfica de los temas de vital importancia para las WSN, atendiendo a sus características y descripciones generales.
2. Estudio de las características de las WSN, específicamente la capa MAC.
3. Descripción de los protocolo MAC para WSN tales como el propuesto en el estándar IEEE 802.15.4, S-MAC y T-MAC.
4. Diseño de experimentos que permitan analizar el desempeño de los diferentes protocolos que se estudian ante diferentes condiciones de carga de tráfico y densidad de nodos.
5. Análisis del desempeño de los protocolos ante diferentes condiciones de carga de tráfico y densidad de nodos a partir de la comparación entre estos y los resultados de simulación de los escenarios diseñados.

## RESUMEN

Las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) son una nueva tecnología con un área investigativa que satisface múltiples aplicaciones a favor de la ciencia y la sociedad. El principal requerimiento de este tipo de redes es reducir el consumo energético, por ello el diseño de sus protocolos deben asegurar que la interfaz de radio (mayor consumidor) opere eficazmente hacia lograr alta eficiencia energética. Los protocolos MAC administran el comportamiento de la interfaz de radio. La IEEE propuso el estándar IEEE 802.15.4 para manejar los problemas que trae consigo la implementación de las WSN, en él se define la capa física y MAC para Redes Inalámbricas de Área Personal de Baja Tasa de Transmisión (LRWPAN).

Existen una multitud de protocolos para la capa MAC en WSN, para la presente investigación se compara el desempeño de los protocolos S-MAC y T-MAC con respecto al propuesto por el estándar IEEE 802.15.4. Mediante el simulador Castalia/OMNeT++ se observa el comportamiento de los protocolos en la red, para ello se define un modelo de simulación y se diseñan dos escenarios variando la carga de tráfico y la densidad de nodos. Los resultados de la simulación de los escenarios demuestran que el protocolo MAC IEEE 802.15.4 es sensible a todas las variaciones a las que se sometió en cada uno de los escenarios, mientras que los protocolos S-MAC y T-MAC demuestran altos consumos energéticos.

## **LISTA DE TABLAS**

- Tabla 1.1 Comparativa de la arquitectura usada para WSN con respecto a otras tecnologías
- Tabla 1.2 Bandas de frecuencias asignadas a las WSN
- Tabla 2.1 Comparación entre algunos simuladores para WSN
- Tabla 2.2 Parámetro generales de la red
- Tabla 2.3 Parámetros del módulo de canal inalámbrico
- Tabla 2.4 Parámetros del módulo de Aplicación
- Tabla 2.5 Parámetros del módulo MAC
- Tabla 2.6 Parámetros del módulo de Radio
- Tabla 2.7 Parámetros del escenario de simulación 1
- Tabla 2.8 Parámetros del escenario de simulación 2

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Elementos de una red inalámbrica de sensores
Figura 1.2	Diagrama en bloques de un nodo sensor
Figura 1.3	Topologías definidas en el estándar
Figura 1.4	Topologías punto a punto especial
Figura 1.5	Protocolos en la capa enlace
Figura 1.6	Tipos de super-trama en el protocolo MAC IEEE 802.15.4
Figura 2.1	Modelo de estructura básico de Castalia
Figura 2.2	Jerarquía de módulos tipo <i>ned</i> de OMNeT++ utilizados por Castalia
Figura 2.3	Estructura de los nodos de sensado en Castalia
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)
Figura 3.2:	Escenario 1: <i>Goodput</i> de la red
Figura 3.3:	Escenario 1: Latencia en la red para el protocolo IEEE 802.15.4
Figura 3.4:	Escenario 1: Consumo de energía promedio de cada nodo
Figura 3.5:	Escenario 2: Paquetes transmitidos a nivel radio (a) y Paquetes recibidos a nivel de aplicación
Figura 3.6:	Escenario 2: <i>Goodput</i> de la red
Figura 3.7:	Escenario 2: Latencia promedio de los paquetes
Figura 3.8:	Escenario 2: Consumo de energía

## LISTA DE ABREVIATURAS

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

## LISTA DE SÍMBOLOS

BI	Intervalo de Guía, calculado según la ecuación 1.2
DN	Densidad de nodos de la WSN
$\eta$	Exponente de pérdidas del trayecto
PL(d)	Pérdidas del trayecto para una distancia
PL(d0)	Pérdidas del trayecto para una distancia de referencia
Rp	Tasa de generación de paquetes por nodo de la WSN
RDC	Ciclo útil de radio
$\sigma$	Desviación estándar de $X_\sigma$
$\sigma_{bd}$	Desviación estándar de una variable aleatoria gaussiana de media cero
$X_\sigma$	Variable aleatoria gaussiana de media cero con desviación estándar igual a
$\sigma$	

## TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA .....	II
AGRADECIMIENTO .....	III
TAREA TÉCNICA.....	IV
RESUMEN .....	V
LISTA DE TABLAS .....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE ABREVIATURAS .....	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
INTRODUCCIÓN .....	1
Descripción y caracterización de la capa MAC en las WSN.....	4
1.1    Generalidades de las WSN.....	4
1.1.1 Características de las WSN.....	4
1.1.2 Requisitos en las redes de sensores inalámbricas .....	7
1.2 Características de la capa MAC.....	8
1.2.1 IEEE 802.15.4, estándar de las redes inalámbricas de sensores .....	8
1.3 Protocolos MAC de estudio.....	16
1.3.1 Protocolo MAC IEEE 802.15.4 .....	18
1.3.2 Protocolo Sensor MAC.....	20
1.3.3 Protocolo Time-out MAC.....	21

1.4 Consideraciones finales del capítulo.....	22
Protocolos MAC en Castalia/OMNeT++ y escenarios de simulación .....	24
2.1 Simuladores para WSN .....	24
2.1.1 NS-2 .....	26
2.1.2 OPNET Modeler .....	27
2.1.3 GNS3 .....	27
2.1.4 NS-3 .....	28
2.1.5 OMNET++.....	28
2.2 Selección de Castalia/OMNeT++ .....	30
2.2.1 Análisis de herramienta Castalia y Model de Simulación .....	33
2.2.2 Módulo de Canal Inalámbrico .....	34
2.2.3 Módulo de Aplicación .....	35
2.2.4 Módulo MAC.....	36
2.2.5 Módulo Radio .....	37
2.3 Escenarios de simulación .....	39
2.3.1 Escenario 1.....	39
2.3.2 Escenario 2.....	40
2.4 Consideraciones finales del capítulo.....	40
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>42</b>
3.1 Escenario 1: Carga de tráfico.....	42
3.1.1 Conclusiones parciales del epígrafe.....	45
3.2 Escenario 2: Densidad de nodos .....	46
3.2.1 Conclusiones parciales del epígrafe.....	48

3.3 Conclusiones finales del capítulo .....	48
CONCLUSIONES.....	50
RECOMENDACIONES.....	52
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	53
ARCHIVOS DE CONFIGURACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN.....	57

## INTRODUCCIÓN

Una red de sensores inalámbricos (WSN, por sus siglas en inglés) consiste en una gran cantidad de pequeños dispositivos con poco poder computacional, comunicación inalámbrica y capacidades de sensado. Estos nodos sensores generalmente se diseminan sobre la región en estudio, donde cada nodo sensor es responsable de extraer datos del entorno tales como humedad, temperatura, presión y luminosidad; procesando y enviando estos datos a través de uno o más nodos, los cuales se encargan de la transmisión de los datos al usuario final. El desarrollo del hardware y el software en una red de este tipo se hacen necesarios por consideraciones respecto al consumo energético, puesto que los nodos deben subsistir el mayor tiempo posible con baterías o con fuentes de energía de prestaciones limitadas, como celdas solares[1].

Se han realizado grandes progresos tecnológicos que han permitido fabricar sensores de bajo costo, bajo consumo, pequeño tamaño y con capacidades de comunicación inalámbricas. Estos sensores son capaces de observar y reaccionar ante cambios en su entorno. El potencial uso de este tipo de redes y el número de investigaciones que se publican, demuestran que las mismas se están convirtiendo en una de las tecnologías claves a nivel mundial.

Las WSN son una importante nueva tecnología con potencial para mejorar aplicaciones en campos como la medicina, el transporte, la agricultura, el control de procesos industriales y militares, además de otras aplicaciones a escala global como el monitoreo del terreno, agricultura de precisión, edificios y ciudades inteligentes y otras numerosas aplicaciones. En otras palabras, es muy difícil encontrar un área aplicativa que no pueda beneficiarse de la tecnología de las WSN[4].

Las WSN están compuestas por una arquitectura de capas, cada una de estas brinda un conjunto de servicios a la capa superior. Entre ellas se encuentra la que se encarga del manejo de la comunicación con los nodos vecinos (capa de enlace de datos). El enlace de los datos tiene como principal restricción de diseño la eficiencia energética. Por este motivo se requiere de protocolos específicos a esta tecnología para que la misma pueda actuar durante largos periodos de tiempo. Para ello se eligen protocolos de Control de Acceso al Medio (MAC, por sus siglas en inglés)[3] y además las aplicaciones antes mencionadas tienen requisitos adicionales como tasa de transferencia de datos, latencia y fiabilidad entre otros.

Las características de las WSN hacen que los protocolos desarrollados para redes de sensores deban ser sencillos en términos de software, y además intenten reducir el consumo de energía al mínimo.

La interfaz de radio es la componente que consume más energía dentro de las WSN. La utilización de protocolos MAC diseñados con este objetivo logra un ahorro de energía significativo en la capa de enlace ya que la capa MAC realiza un manejo eficaz de la energía utilizando un Ciclo Útil de Radio (RDC, por sus siglas en inglés). RDC mantiene la interfaz de radio apagada la mayor parte del tiempo y se enciende por períodos cortos en los cuales puede ocurrir la comunicación [3].

En la literatura existen diversos protocolos, algunos pioneros dentro de las WSN y otros a los cuales se les realizan actualizaciones entre ellos se destacan para la presente investigación, *Sensor MAC (S-MAC)*[45], IEEE802.15.4[9] y *Time-out MAC (T-MAC)* [46]. Entre ellos existen diferentes fortalezas y debilidades, todos se basan en el mismo principio pero se comportan de manera diferente. Para la presente investigación es de primordial importancia lograr una comparación entre el protocolo propuesto por el estándar IEEE 802.15.4 con los protocolos antes mencionados para WSN midiendo bajo diferentes valores de carga de tráfico y densidad de nodos el más recomendable.

Varios autores han enmarcado el tema[8, 12, 13,43] por lo que hay una necesidad clara y objetiva de realizar una comparación entre estos protocolos MAC con el protocolo propuesto en el estándar IEEE 802.15.4 mediante el análisis del desempeño de cada uno de estos, propuesta con la que surge la presente investigación científica.

De lo antes planteado surge como **problema científico** de la investigación la necesidad de comparar los protocolos MAC IEEE 802.15.4, S-MAC y T-MAC bajo diferentes condiciones de carga de tráfico, densidad de nodos y niveles de RDC. De este problema científico se desprende que el **objeto de investigación** son los protocolos MAC para WSN, siendo el **campo de acción** la investigación la modelación, simulación y experimentación de protocolos MAC para WSN.

Para responder al problema antes planteado se define como **objetivo general**, comparar el desempeño de los protocolo MAC IEEE 802.15.4, S-MAC y T-MAC ante diferentes condiciones de carga de tráfico a través de simulaciones en Castalia/OMNeT++. Para lograr el objetivo general se desarrollan los siguientes **objetivos específicos**:

1. Describir las Redes de Sensores Inalámbricos, con énfasis en la capa MAC y el diseño de protocolos para la misma.
2. Caracterizar el estándar IEEE 802.15.4 y los protocolos S-MAC y T-MAC.
3. Diseñar experimentos que permitan el análisis y la comparación del desempeño de los protocolos MAC IEEE 802.15.4, S-MAC y T-MAC.
4. Describir y comparar el desempeño de los protocolos MAC IEEE 802.15.4, S-MAC y T-MAC a partir de los resultados de los experimentos realizados en el simulador Castalia/OMNeT++.

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 de los protocolos MAC para WSN tales como IEEE 802.15.4, S-MAC y T-MAC?
3. ¿Qué diseño experimental se puede utilizar para estudiar el desempeño de los protocolos MAC bajo diferentes condiciones de tráfico y niveles de interferencia?
4. ¿Cuál es el desempeño de los protocolos MAC que se estudian según los resultados de los experimentos realizados bajo la comparación de los mismos?

La novedad científica de esta investigación radica en la realización de una comparación de protocolos para la capa MAC. 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 de los protocolos.

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++. Por ello, la investigación científica que se pretende llevar a cabo no requerirá recursos adicionales a los ya existentes y sus diferentes resultados provocarán un mejor entendimiento del uso acertado de los protocolos en la capa MAC, que contribuirán de manera significativa al despliegue de WSN y el empleo de protocolos MAC eficientes para las mismas.

El presente trabajo de diploma está formado por la introducción, el desarrollo organizado en tres capítulos, las conclusiones, seguido de las recomendaciones para investigaciones futuras, y por último las referencias bibliográficas y anexos.

Introducción: Se abordan los antecedentes de la realización de la investigación así como la objetividad de la realización de la misma.

Capítulo I: En este capítulo se brinda una descripción general e importancia de las WSN. Además se enumeran algunas de las características de la capa MAC que la hacen muy importante en el consumo de energía y desempeño de las WSN. Finalmente se abordan explicaciones generales de funcionamiento de los protocolos IEEE 802.15.4, S-MAC y T-MAC.

Capítulo II: Se describen brevemente algunos simuladores muy importantes para WSN. Se fundamenta la selección del simulador Castalia/OMNeT++ para la presente investigación. Por último, se describen los escenarios de simulación,

Capítulo III: Presentación y discusión de los resultados de la simulación de los escenarios descritos en el capítulo anterior. En la discusión de los resultados se presentan las conclusiones sobre el desempeño de los protocolos MAC IEEE 802.15.4 en comparación con S-MAC y T-MAC extraídas de cada uno de los escenarios.

---

# CAPÍTULO 1

## Descripción y caracterización de la capa MAC en las 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 brinda una descripción general e importancia de las WSN. A continuación, en la sección 1.2, se abordan las principales características de la capa MAC que la hacen muy importante en el consumo de energía y desempeño de las WSN, haciendo énfasis en el estándar IEEE 802.15.4. En la sección 1.3, se realiza una descripción general de los protocolos MAC IEEE 802.15.4, S-MAC y T-MAC básicas para el funcionamiento de las WSN. Finalmente, la sección 1.4 resume algunas consideraciones finales del capítulo.

### 1.1 Generalidades de las WSN

Las redes de sensores inalámbricas se componen de multitud de dispositivos (incluso miles en determinados casos) autónomos y distribuidos alrededor del fenómeno objeto para monitorizarlo[1]. Debido al auge de las redes de sensores, estos se despliegan en múltiples entornos. Si a estas redes le añadimos capacidad de comunicación inalámbrica y de comunicación entre sí formando redes, obtenemos las redes de sensores inalámbricas, que cada día cobran mayor importancia debido a la multitud de aplicaciones que se están desarrollando, como aplicaciones en el ámbito de la seguridad, salud, seguimiento de eventos, etc.

La colaboración entre los dispositivos es de vital importancia ya que un nodo aislado es incapaz de comunicarse por sí mismo. Por ser pequeños y baratos, los nodos sensores, pueden ser producidos y desplegados en gran número. Sus limitaciones en términos de energía, memoria, velocidad de cálculo y ancho de banda son aspectos importantes a tener en cuenta a la hora de un despliegue de redes de este tipo. Además, los nodos sensores son empleados a menudo en entornos hostiles o en lugares de difícil acceso, por lo que la batería de un nodo sensor a menudo no se puede reemplazar ni ser recargable.

La forma de reducir el consumo de energía para prolongar la vida útil de los nodos sensores se convierte en un tema crítico, pues es uno de los mayores problemas de las redes de sensores. Los protocolos de comunicación de diferentes capas están diseñados con la conservación de la energía como aspecto fundamental a tener presente.

#### 1.1.1 Características de las WSN

Las WSN tienen una serie de características propias y otras adaptadas de las redes ad-hoc según [5]:

- Topología dinámica: En una red de sensores la topología debe ser cambiante, estos tienen que adaptarse para poder comunicar los nuevos datos adquiridos.

- Variabilidad del canal: El canal radio es un canal muy variable en el que existen una serie de fenómenos como pueden ser la atenuación, desvanecimientos rápidos, desvanecimientos lentos e interferencia que puede producir errores en los datos.
- No se utiliza infraestructura de red: Una red de sensores no necesita de una infraestructura para operar, ya que sus nodos pueden actuar de emisores, receptores, o enrutadores de la información. Hay que destacar en el concepto de red de sensores al nodo recolector, o *sink node*, que es el nodo que recolecta la información y por el cual se recoge además la información generada comúnmente.
- Tolerancia a errores: La red de sensores tiene que ser capaz de seguir funcionando a pesar de tener errores de cualquier tipo dígame interferencia, problemas en algún dispositivo, etc.
- Comunicaciones multi-salto: Los nodos dentro de la red deben auto-organizarse y colaborar en la detección y el reenvío de información hacia uno o varios destinos.
- Consumo energético: Es uno de los factores más sensibles debido a que tienen que conjugar autonomía con capacidad de proceso, ya que actualmente cuentan con una cantidad de energía limitada. Un nodo sensor tiene que contar con un procesador de consumo ultra bajo así como de un transceptor de radio con las mismas características, a esto hay que agregar un software que también conjugue esta característica haciendo el consumo aún más restrictivo.
- Limitaciones de hardware: Para poder conseguir un consumo ajustado, se hace indispensable que el hardware sea lo más sencillo posible, así como su transceptor de radio, lo que conlleva a una capacidad de procesamiento limitada.
- Costes de producción: Dada la naturaleza de una red de sensores, la misma por lo general tiene que tener un número elevado de dispositivo, los nodos sensores una vez definida su aplicación, deben ser económicos si son fabricados en grandes cantidades.

Las redes de sensores están formadas por una serie de elementos(ver figura 1.1):

- Nodo sensor: descritos a continuación.
- Pasarelas o *Gateways*: Elementos para la interconexión entre la red de sensores y una red TCP/IP.
- Estaciones base: Recolectores de datos basados en un ordenador común, dispositivo móvil, etc.
- Comunicación inalámbrica: Basada en el estándar 802.15.4-ZigBee.

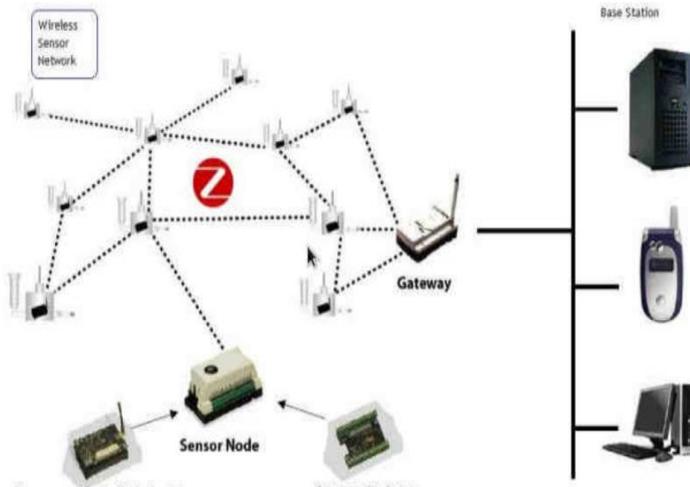


Figura 1.1 Elementos de una red inalámbrica de sensores

Los nodos sensores son muy simples en cuanto a interfaz y componentes[1]. En la figura 1.2 se muestra que cada nodo dispone de:

- Un bloque de comunicación, habitualmente un transceptor de radio u otro dispositivo de comunicación inalámbrica.
- Un bloque de procesamiento, frecuentemente un pequeño micro-controlador.
- Una fuente de energía (típicamente una batería).
- Un bloque de sensado, que incluye desde uno a múltiples sensores para medir la información requerida del exterior.

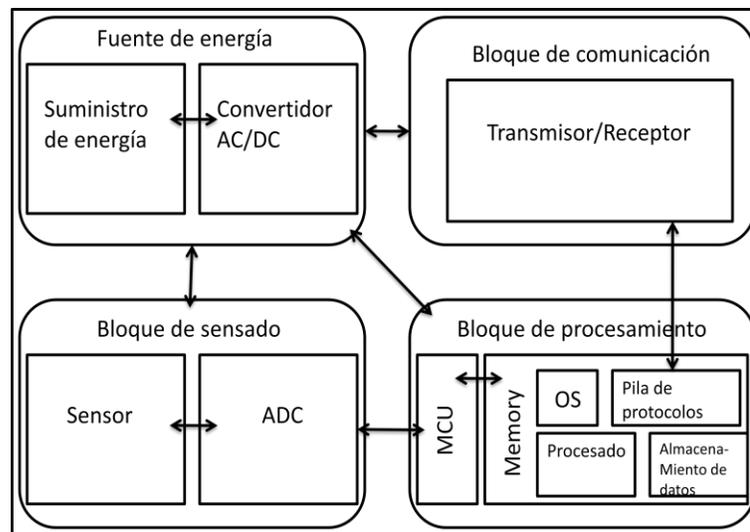


Figura 1.2 Diagrama en bloques de un nodo sensor[1]

Por otro lado se definen una *pila* de protocolos para la comunicación entre dispositivos que requieren algoritmos de enrutado multi-salto, de forma que dentro de una WSN los nodos se auto-organizan y colaboran en la detección y el reenvío de información hacia uno o varios destinos dependiendo del tipo de red y del flujo de datos entre nodos. Los distintos protocolos tienen distintas características y requerimientos. Además, recordar que los nodos de una red de este tipo deben ser robustos para permitir su implantación en medios hostiles, deben tener un bajo consumo energético y producción económica.

### 1.1.2 Requisitos en las redes de sensores inalámbricas

En la sub-sección anterior se describen las características genéricas que deben poseer las redes inalámbricas de sensores, para satisfacerlas las redes de sensores tienen que cumplir una serie de requisitos. Como se puede intuir, tanto las características anteriormente mencionadas como los requisitos pueden variar dependiendo de la aplicación en concreto y los siguientes requisitos son comunes a la mayoría de las redes de sensores inalámbricas. Según [1] los requisitos principales para WSN son:

- **Eficiencia energética:** Es uno de los asuntos más importantes en estas redes. Cuanto más se consiga bajar el consumo de los nodos mayor será el tiempo durante el cual puedan operar y, por tanto, mayor tiempo de vida tendrá la red. La aplicación tiene la capacidad de bajar este consumo de potencia restringiendo el uso de la CPU y del transceptor de radio. Esto se consigue desactivándolos cuando no se utilizan y, sobre todo, disminuyendo el número de mensajes que generan y transmiten los nodos.
- **Auto-organización:** La topología empleada debe permitir rutas por las cuales mandar los datos obtenidos. Cada nodo debe conocer su lugar en la topología a partir de los protocolos que le enseñan su lugar en la red, o sea que resulta poco práctico realizarlo manualmente debido al gran número de estos. Este proceso no solo debe ejecutarse cuando la red comience a funcionar sino que debe permitir en todo momento cambios en la misma.
- **Escalabilidad:** Las aplicaciones para este tipo de redes están en constante progreso por lo que la red debe ser capaz de permitir su crecimiento. No solo es necesario que la red trabaje correctamente con los nodos iniciales con los que se creó, sino que debe permitir la ampliación de la misma sin que las prestaciones de esta colapsen.
- **Tolerancia a fallos:** Los nodos sensores son dispositivos propensos a fallar debido al bajo coste con el que los mismos son creados. Las causas de fallo principales son debido al estado de la batería, errores de programación, condiciones ambientales y el estado de la red. Por todos los medios se debe evitar que un fallo en un nodo individual implique el mal funcionamiento de la red.
- **Tiempo real:** Los datos llegan a su destino con cierto retraso, solo algunos datos deben ser entregados en un tiempo conocido o los mismos dejan de ser válidos. En caso de que una aplicación tenga alguna restricción debe tomar las medidas que garanticen la llegada a tiempo de los datos.

- Seguridad: Las comunicaciones inalámbricas viajan por un medio fácilmente accesible a personas ajenas a la red de sensores. Esto implica un riesgo potencial para los datos recolectados y para el funcionamiento de la red.

Según la red que se diseñe algunos de los requisitos anteriores cobran mayor importancia. Es necesario encontrar el peso que tienen cada uno de los requisitos en el diseño de la red, pues normalmente unos van en detrimento de otros. Por ejemplo, dotar a una red de propiedades de tiempo real podría implicar aumentar la frecuencia con la que se envían los mensajes con datos, lo cual repercutirá en un mayor consumo de potencia y por ende un menor tiempo de vida de los nodos. Para cada aplicación existe un compromiso entre los requisitos anteriores que permita lograr un funcionamiento de la red adecuado para la misión de la misma.

## 1.2 Características de la capa MAC

La capa de enlace es una de las áreas de investigación más activas en las redes de sensores inalámbricas. Existen una multitud de protocolos de capa de enlace específicos para redes de sensores inalámbricas. A continuación se muestra el estándar que soporta los requisitos mencionados en la sección anterior.

### 1.2.1 IEEE 802.15.4, estándar de las redes inalámbricas de sensores

#### Características generales de la capa MAC:

Las características que deben proporcionar la capa MAC para WSN son:

- Eficiencia energética para prolongar la vida del sensor.
- Escalabilidad y adaptabilidad a cambios (Tamaño de la red, densidad de nodos y topología).
- Otras características a tener en cuenta son:
  - Latencia
  - *Throughput*
  - BW (ancho de banda)

Como se muestra, los nodos deben consumir la menor cantidad de energía posible. En el siguiente sub-epígrafe se muestra como los distintos protocolos propuestos han sido diseñados para evitar los principales puntos que implican un mayor consumo de energía que son según K. Langendoen en [4]:

- Escucha inactiva: Para la mayoría de transceptores inalámbricos para WSN, el consumo de potencia en estado de escucha inactiva no es mucho más bajo que en estado de recepción. Por lo tanto, si un nodo permanece en estado de inactividad constantemente esperando una posible transmisión, su consumo energético se dispara. Por este motivo, los nodos deben conmutar al estado de recepción solo cuando realmente vayan a recibir tramas, y volver inmediatamente al estado de sueño.
- Sobre-escucha: La recepción de tramas de datos que no están destinadas realmente a la estación que las recibe representa otra fuente de desperdicio energético. Por lo tanto,

debe evitarse la sobre escucha sistemática del tráfico dirigido a otros nodos. Los mecanismos utilizados para evitar la sobre-escucha tienen que asegurarse que este sea improbable e infrecuente.

- **Colisiones:** Las tramas irrecuperables debido a interferencias con transmisiones de nodos adyacentes constituyen también un gasto energético no despreciable, ya que los esquemas ARQ, por sus siglas en inglés requieren retransmisiones costosas. Energéticamente hablando, a menudo compensa introducir mecanismos para evitar estas colisiones o para disminuir la probabilidad de padecerlas.
- **Overhead:** Los mensajes de control y la información de señalización almacenada en las cabeceras de las tramas para gestionar las operaciones del protocolo MAC permiten al esquema de comunicaciones a operar tal y como se indica, pero no llevan asociado ninguna carga útil. Por consiguiente hay que intentar que la cantidad de información de señalización en la capa MAC sea mínima.

Para cumplir con los requisitos propios de las WSN, y el más importante, la eficiencia energética, se llega a la conclusión de que los estándares desarrollados eran deficientes (ver Tabla 1.1) y por ello se comienza a desarrollar una serie de estándares para las WSN. Todos implementados sobre el mismo estándar radio denominado IEEE 802.15.4-2006 y sus posteriores revisiones.

Tabla 1.1 Comparativa de la arquitectura usada para WSN con respecto a otras tecnologías

	ZigBee-802.15.4	Bluetooth 802.15.1	Wi-Fi 802.11b	GPRS/GSM 1XRTT/CDMA
<b>Enfoque de aplicación</b>	Supervisión y control	Reemplazo de cable	Web, Video, Email	WAN, Voz/Dato
<b>Recursos del sistema</b>	4KB-32KB	250KB+	1MB+	16MB+
<b>Vida de la batería (días)</b>	100-1000+	1-7	1-5	1-7
<b>Nodos por red</b>	255/65K+	7	30	1,000
<b>Ancho de banda(kbps)</b>	20-250	720	11,000+	64-128
<b>Rango(metros)</b>	1-75+	1-10+	1-100	1,000+
<b>Atributos claves</b>	Bajo poder, fiable y costo eficaz	Cueste y conveniente	Rápido y flexible	Alcance y calidad

La IEEE y la ZigBee Alliance trabajaron conjuntamente con el objetivo de especificar la pila de protocolos para las redes WSN. La relación entre IEEE 802.15.4 y ZigBee es parecida a la existente entre IEEE 802.11 y Wi-Fi Alliance. El resultado del enlace comprende al estándar IEEE 802.15.4, centrado en las especificaciones de las dos capas

más bajas del protocolo (capa física y de enlace) y la ZigBee Alliance diseñó las capas más altas de la pila de protocolos (desde la capa de red hasta la de aplicación).

El estándar IEEE 802.15.4[10] define las aplicaciones de la capa física (PHY) y de la subcapa de control de acceso al medio para conexiones inalámbricas con baja tasa de transmisión, entre dispositivos simples que consumen muy poca potencia operando en un espacio personal de operación de 10 metros.

El estándar IEEE 802.15.4 emplea un protocolo íntegramente *handshake* para obtener fiabilidad en la transmisión de datos, e incrusta el AES para transmisión de datos seguros. El estándar incluye especificaciones detalladas de los siguientes puntos: tipo de dispositivo, estructura de trama, estructura de super-trama, modelo de transferencia de datos, robustez, consideraciones de consumo de potencia y seguridad.

Se definen en el estándar dos tipos de nodo de red:

- Dispositivo de funcionalidad completa (FFD, por sus siglas en inglés): Tienen dos modos de funcionamiento: como coordinador de una red de área personal PAN o como un nodo normal. Implementa un modelo de comunicación que le permite intercambiar mensajes con cualquier otro dispositivo. Además, es capaz de encaminar mensajes actuando como coordinador.
- Dispositivos de funcionalidad reducida (RFD, por sus en inglés): Son dispositivos muy sencillos, con recursos y necesidades de comunicación muy limitadas. No pueden actuar como coordinadores y sólo pueden comunicarse con otros FFD. Las redes pueden construirse como redes punto a punto o en estrella. En cualquier caso, toda red necesita al menos un FFD que actúe como coordinador.

Se definen tres tipos de topologías de red (ver figura 1.3):

- Redes punto a punto
- Árbol de grupo (*cluster tree*)
- Redes en estrella

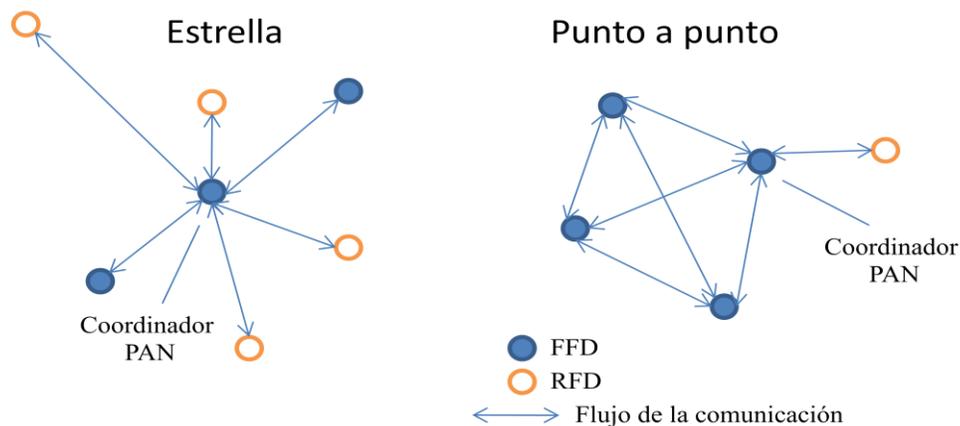


Figura 1.3 Topologías definidas en el estándar

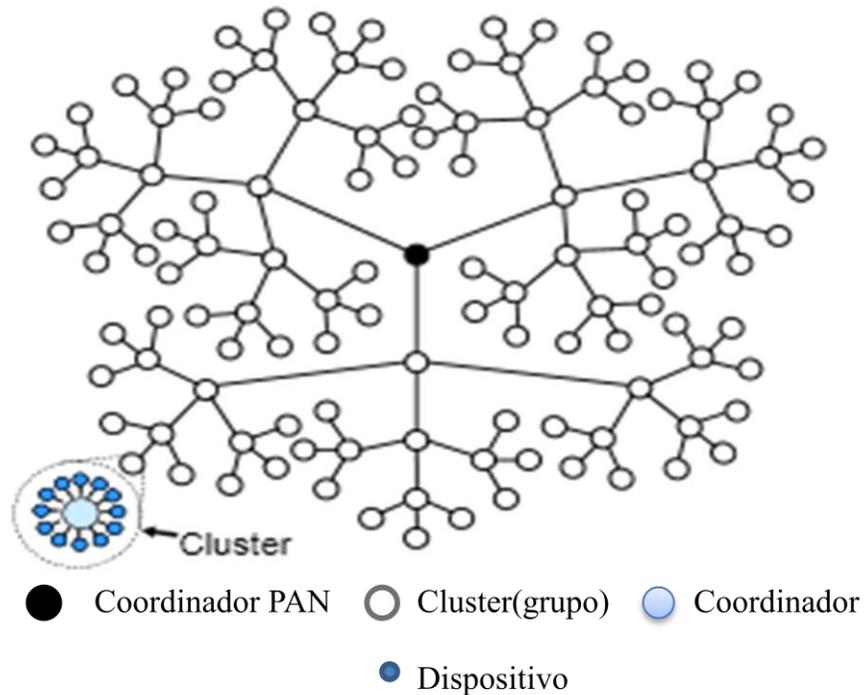


Figura 1.4 Topologías punto a punto especial

**Capa física:**

La capa física proporciona el servicio de transmisión de datos sobre el medio físico, así como el interfaz con el servicio de gestión por medio del cual se puede acceder a todos los servicios de gestión del nivel. De esta manera, la capa física controla el transceptor de radio-frecuencia y realiza la selección de canales junto con el control de consumo y de señal.

Principales funciones:

- Activación y desactivación del transceptor radio.
- Detección de energía (ED).
- Indicador calidad enlace (LQI).
- Evaluación canal libre (CCA).
- Selección de frecuencia del canal.
- Transmisión y recepción de datos.

**Activación y desactivación del transceptor radio**

Configura el transceptor de radio en uno de sus tres posibles estados, transmisión, recepción o apagado (durmiendo), de acuerdo con la petición de la subcapa MAC.

### **Detección de energía(ED)**

Es una estimación de la potencia de señal recibida dentro del ancho de banda de un canal IEEE 802.15.4. El resultado del ED puede ser utilizado por la capa de red como parte de un algoritmo de selección de canal, o para propósitos de la verificación de estado del canal (CCA, por sus siglas en inglés).

### **Indicador calidad enlace (LQI)**

La medida del LQI se lleva a cabo para cada paquete recibido. La capa física utiliza el ED del receptor, una señal de ruido de radio, o una combinación de las dos para medir la fuerza y/o la calidad de un enlace en el que se ha recibido un paquete. Sin embargo, no está especificado en el estándar el uso del LQI por las capas de red o de aplicación.

### **Evaluación canal libre (CCA) para CSMA/CA**

Se requiere la capa física para llevar a cabo la CCA, utilizando ED, detección de portadora, o una combinación de las dos. En modo ED, se considera el medio ocupado si se detecta una energía superior a un umbral predefinido. En modo detección de portadora, se considera el medio ocupado si se detecta una señal con la modulación y las características difundidas en el estándar. Finalmente, en el modo combinado, se deben cumplir ambas condiciones para concluir que el medio está ocupado.

### **Selección de frecuencia del canal**

Los enlaces inalámbricos bajo el estándar IEEE 802.15.4 pueden operar en 16 canales. Por ello, la capa física debe ser capaz de sintonizar su transceptor dentro de un canal determinado, en lugar de recibir una petición desde la subcapa MAC.

### **Transmisión y recepción de datos**

Es la tarea esencial de la capa física. En esta parte se utilizan modulación y técnicas de extensión. A 2,4 GHz, la capa física emplea una técnica de modulación quasi-ortogonal 16-aria, en la que cada cuatro bits de información son ubicados dentro de una secuencia de ruido pseudoaleatoria (PN) de 32 chips o sea utiliza DSSS. Las secuencias PN para símbolos de datos sucesivos son entonces concatenadas y moduladas sobre la portadora utilizando O-QPSK.

En 868/915 MHz, la capa física emplea DSSS, por sus siglas en inglés con BPSK, para modulación chip, y codificación diferencial para codificación de símbolo de datos. Cada símbolo de datos se ubica dentro de una secuencia PN de 15 chips, y las secuencias PN concatenadas son entonces moduladas sobre la portadora utilizando BPSK con una forma de pulso de coseno alzado.

El estándar permite transmisión en tres frecuencias distintas(ver Tabla 1.2): 868Mhz, 915Mhz y 2400Mhz es en ésta última donde más se suele emitir porque es la frecuencia libre de emisión a nivel mundial y por tanto la emisión en ella no requieren licencia, es la

conocida banda ISM (*Industrial Scientific Medical*). En la tabla 1.2 se observan las distintas características de cada una de las bandas de frecuencia.

Tabla 1.2 Bandas de frecuencias asignadas a las WSN

Banda de frecuencia (MHz)	Número de canales	Razón de datos (kb/s)	Razón de símbolos (ksym/s)
868	1	20	20
915	10	40	40
2400	16	250	62,5

### Subcapa MAC:

Transmite tramas MAC usando el canal físico. Además del servicio de datos, ofrece un interfaz de control y regula el acceso al canal físico. También controla la validación de las tramas y las asociaciones entre nodos, y garantiza *ranuras* temporales. Por último, ofrece puntos de acceso para servicios seguros.

En resumen, las principales funciones de la capa MAC[14]:

- Generación del *beacon* de red (si el dispositivo es un coordinador)
- Sincronización de los *beacon*
- Soporte de asociación y disociación de PAN (*Association* y *Disassociation*)
- Soporte a la seguridad del dispositivo
- Empleo del mecanismo de CSMA/CA para acceso al canal
- Manejo y mantenimiento del mecanismo Ranuras de Tiempo Garantizada (GTS, por sus siglas en inglés)
- Enlace fiable entre dos entidades MAC

### Generación de *beacon* de red

Un coordinador puede determinar si trabajar en modo *beacon*, en el que se utiliza una estructura de super-trama. La super-trama está limitada por dos *beacon* y está dividida en ranuras de igual tamaño (el valor por defecto es 16). Un coordinador envía *beacon* periódicamente para sincronizar sus dispositivos adjuntos, y con otros propósitos.

### Sincronización de los *beacon*

Un dispositivo adjunto a un coordinador que opera en modo *beacon* puede rastrear los *beacon* para sincronizarse con el coordinador. Esta sincronización es importante para el sondeo de datos, el ahorro energético y la detección de huérfanos.

### **Soporte de asociación y disociación de PAN**

Para soportar la auto-configuración, el estándar IEEE 802.15.4 incluye las funciones de asociación y disociación en la subcapa MAC. Esto no solo habilita a una red en estrella a ser configurada automáticamente, sino que además permite la creación de una red punto a punto auto-configurable.

### **Empleo del mecanismo de CSMA/CA**

Como la mayoría de los otros protocolos diseñados para redes inalámbricas, se utiliza el mecanismo de CSMA/CA para acceso al canal. Sin embargo, el estándar no incluye el mecanismo RTS y CTS, debido a la baja tasa de datos utilizada en las LR-WPAN.

### **Manejo y mantenimiento del mecanismo GTS**

Cuando se trabaja en modo *beacon*, un coordinador puede asignar porciones de la parte activa de la super-trama a un dispositivo. Estas porciones se denominan GTS y componen el Período Libre de Contención (CFP, por sus siglas en inglés) de la super-trama.

### **Enlace fiable entre dos entidades MAC**

La subcapa MAC emplea varios mecanismos para habilitar la fiabilidad del enlace entre dos estaciones. Entre ellos se encuentra el reconocimiento de tramas y la retransmisión, la verificación de datos utilizando CRC de 16 bits, así como también el mismo CSMA/CA.

Para entender correctamente los conceptos de Asociación y Sin Asociación se precisa comentar en primer momento del proceso de “descubrimiento del dispositivo” que es el proceso mediante el cual el FDD de una PAN indica de su presencia enviando periódicamente tramas guías (*beacon*).

La asociación es el proceso mediante el cual un dispositivo que no pertenece a una PAN se incorpora a ella. El dispositivo debe realizar un escaneado activo y pasivo del canal a fin de capturar tramas guías emitidas por el FDD.

El dispositivo sin asociar inicia el proceso de asociación enviando un comando de petición de asociación al FDD. Suponiendo que el coordinador recibe dicho comando, envía un mensaje notificando la recepción correcta (ACK). Este mensaje no conlleva a que se produzca la asociación. El FDD requiere un cierto tiempo para determinar si posee recursos para permitir a otro dispositivo asociarse. En caso afirmativo, el coordinador asignará una dirección corta al dispositivo y generará un comando de respuesta notificando al dispositivo la dirección y el éxito de la asociación y en caso contrario, enviará un comando de respuesta que la misma no es posible.

El proceso opuesto, permite tanto a un FDD excluir a determinado dispositivo de la PAN que coordina, como a un dispositivo abandonar la PAN que pertenece. Cuando un FDD excluye a un dispositivo elimina todas las referencias a dicho dispositivo mientras que si un dispositivo pretende abandonar la PAN, elimina todas las referencias que posee de la misma.

De la misma manera que ocurre en el proceso anterior, se envía un comando de notificación de disociación al dispositivo. Se genera un ACK, y si no llega igualmente el

FDD lo considera fuera de su PAN. Igualmente así para cuando el dispositivo es el que se disocia.

### **Transmisión de datos:**

Las tramas son la unidad básica de transporte y en el estándar se define de forma tal que logre de forma razonable llegar a ser robusta y a su vez sencilla.

Existen cuatro tipos de tramas en la capa de enlace:

- Datos
- Sincronización
- *Beacon*
- Control MAC

Además, es posible utilizar una estructura de *super-trama* definida por el coordinador. Las *super-tramas* (ver sub-epígrafe 1.3.1) suelen utilizarse cuando hay dispositivos de baja latencia, que deben mantener sus asociaciones incluso ante largos periodos de inactividad.

La transferencia de datos puede ocurrir de tres maneras diferentes:

- De dispositivo a coordinador
- De coordinador a dispositivo
- De una estación a otra en una red multi-salto punto a punto

Se pueden clasificar las transferencias de datos en los siguientes tipos:

- **Transmisión de datos directa**

Para todas las transferencias de datos, tanto de dispositivo a coordinador, como de coordinador a dispositivo, o entre dos estaciones. Se utiliza CSMA/CA ranurado para la transmisión de datos, dependiendo de si se usa el modo *beacon* habilitado o inhabilitado.

- **Transmisión de datos indirecta**

Solo para transferencias de datos de un coordinador a sus dispositivos. En este modo, una trama de datos se mantiene en una lista de transacciones por el coordinador, esperando a su extracción por parte del dispositivo correspondiente. Un dispositivo puede averiguar si tiene un paquete pendiente en la lista de transacciones comprobando las tramas *beacon* recibidas de su coordinador. Ocasionalmente, la transmisión indirecta puede también ocurrir en modo sin *beacon*. Por ejemplo, durante un procedimiento de asociación, el coordinador mantiene la trama de respuesta a la asociación en su lista de transacciones y el dispositivo sondea y extrae la trama de respuesta a la asociación. Una ranura CSMA/CA se utiliza en el procedimiento de extracción de datos.

- **Transmisión de datos GTS**

Solo para transferencias de datos entre un dispositivo y su coordinador, tanto del dispositivo al coordinador como del coordinador al dispositivo. No se necesita CSMA/CA en los GTS.

La conservación de potencia ha sido uno de los focos de investigación para redes inalámbricas, ya que la mayoría de dispositivos en redes inalámbricas son alimentados por baterías. El estándar fue desarrollado pensando en disponibilidad de suministro de potencia limitado y favorece dispositivos alimentados por baterías. La estructura de super-trama y la transmisión indirecta son ejemplos de ello.

### **Fiabilidad y seguridad:**

Al medio físico se accede utilizando CSMA/CA que es uno de los algoritmos de contención más usado en WSN, donde en lugar de detectar las colisiones, el algoritmo trata de evitarlas. Si un dispositivo es incapaz de procesar una trama, no confirma su recepción. Se pueden realizar reintentos basados en expiración después un determinado número de veces, tras lo cual se decide si continuar intentándolo o descartar la trama por error en la transmisión.

Respecto a la seguridad en las comunicaciones, la subcapa MAC ofrece funcionalidades a los niveles superiores para poder alcanzar el nivel de seguridad deseado. Existe también un modo MAC inseguro que permite la utilización de las listas de control de acceso únicamente como mecanismo de decisión de tramas en base a su supuesto origen.

De forma general la subcapa MAC, perteneciente a la capa de enlace de datos, se encarga del control de acceso al medio y es responsable de transmitir los paquetes. También lleva las labores de validar las tramas que recibe, comprobar errores en la transmisión y confirmar la recepción de tramas al emisor. Otras funciones menos relevantes para nuestro estudio, pero también importantes, son la fragmentación de paquetes, control de flujo, tasa de transmisión y funciones relacionadas con la gestión de la batería. En resumen se encarga de controlar un medio de comunicación compartido por una serie de dispositivos que se comunican a través de él.

### **1.3 Protocolos MAC de estudio**

Se cierra el capítulo 1 mostrando las características comunes de algunos de los protocolos en la capa de enlace con el objetivo de servir de guía a la comparación posterior de los protocolos MAC IEEE 802.15.4, S-MAC y T-MAC.

En esta sección se pretende realizar una breve descripción de los protocolos MAC IEEE 802.15.4, S-MAC y T-MAC en el cual no se pretende mostrar los detalles de los mismos sino plantear aquellos aspectos que implican su funcionamiento global, aspectos de vital importancia para el desenvolvimiento de las WSN.

En la literatura hay multitud de protocolos de capa de enlace tal y como se observa en la figura 1.9.

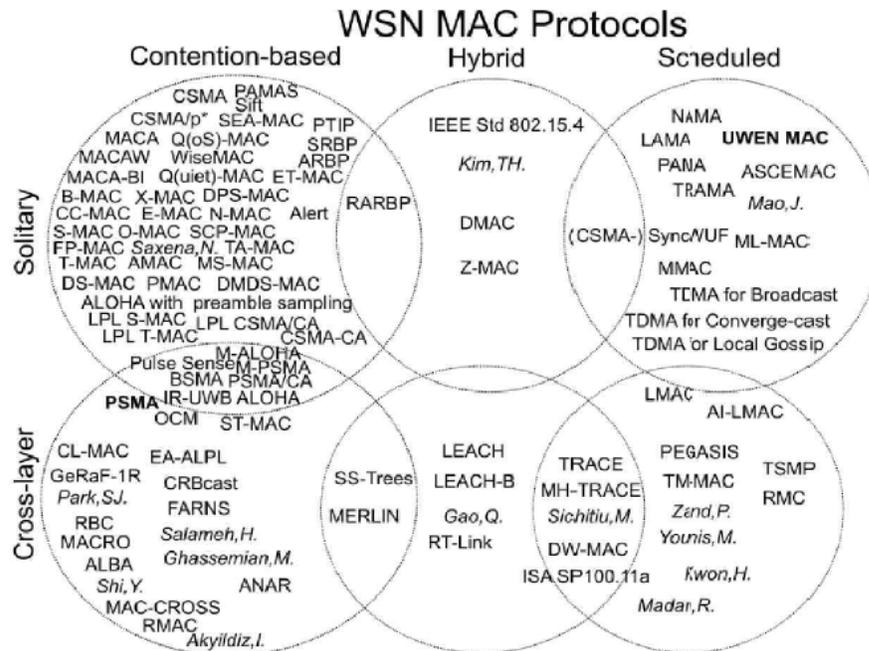


Figura 1.5 Protocolos en la capa enlace

Los protocolos *Cross-Layer* se van a obviar en este proyecto porque no se limitan sólo a la capa de enlace sino que comprenden más capas, y por ello no se encuentran en los objetivos de los cuales parte este proyecto.

Los protocolos de la capa de enlace en WSN los podemos dividir en dos grupos dependiendo del uso de técnicas de contención o no. La técnica de contención intenta evitar las colisiones debidas a que dos dispositivos intenten enviar información simultáneamente a través del mismo canal. Para ello, estos protocolos de contención establecen mecanismos y reglas para minimizar el número de colisiones. Por el contrario los protocolos de arbitraje, están libres de colisiones pero presentan problemas de sincronización.

Las restricciones de las redes de sensores, especialmente el ahorro de energía, influyen directamente en el diseño de los protocolos MAC. Estos protocolos se pueden agrupar también en dos clases básicas, los protocolos ranurados y los basados en muestreo. En los protocolos ranurados, los nodos dividen el tiempo en intervalos discretos (ranuras de tiempo), y los planifican dependiendo de si la radio está en modo recepción, modo transmisión o apagada. Sincronizar las ranuras con los vecinos permite que los nodos enciendan la radio solamente cuando sea necesario, con lo que se reduce considerablemente el escucha inactiva. Estos protocolos a menudo son estáticos; después de que se planifique un determinado horario o sincronización para las ranuras, un nodo solo puede comunicarse con otros nodos dentro del mismo periodo de estas previamente establecido. Los periodos cortos de comunicación pueden conducir a un aumento de la contención, y los costes de la sincronización y mantenimiento penalizan el consumo energético y el ancho de banda. Los protocolos ranurados incluyen los protocolos TDMA, IEEE 802.15.4, S-MAC, T-MAC y TRAMA.

La segunda clase de protocolos son los basados en muestreo. En lugar de coordinar las ranuras de tiempo, los nodos despiertan periódicamente en busca de actividad en el canal de radio, si la detectan, comienzan a recibir los datos. Dependiendo de la capa física, esta detección se puede basar en el nivel de energía del canal o en la detección de portadora. El muestreo periódico del canal permite que un nodo ahorre energía manteniendo su radio apagada la mayor parte del tiempo. En contraste con los protocolos ranurados, los protocolos de muestreo son muy flexibles: un nodo puede comunicarse con otro cualquiera dentro del alcance del radio. Pero la flexibilidad tiene un costo: mientras que los protocolos ranurados envían los paquetes de datos regularmente, en muestreo hay que enviar mensajes largos y costosos para despertar a un vecino. Dentro de los protocolos basados en muestreo se encuentran: Aloha, B-MAC y WiseMAC[3].

### 1.3.1 Protocolo MAC IEEE 802.15.4

El protocolo IEEE802.15.4[9] surge por la necesidad de tener un protocolo estándar de bajo consumo y bajo ancho de banda para redes de sensores. 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 *super-trama* compuesta por una Guía, que da inicio a la *super-trama*.

El modelo de transferencia presenta diversas alternativas. El IEEE802.15.4 permite la definición de lo que se denomina como *super-trama*. La *super-trama* está formada por 16 ranuras de tiempo y está delimitada por dos tramas de tipo *beacon* o trama guía. Existen tres variantes de la *super-trama* que se muestran en las siguientes figuras.

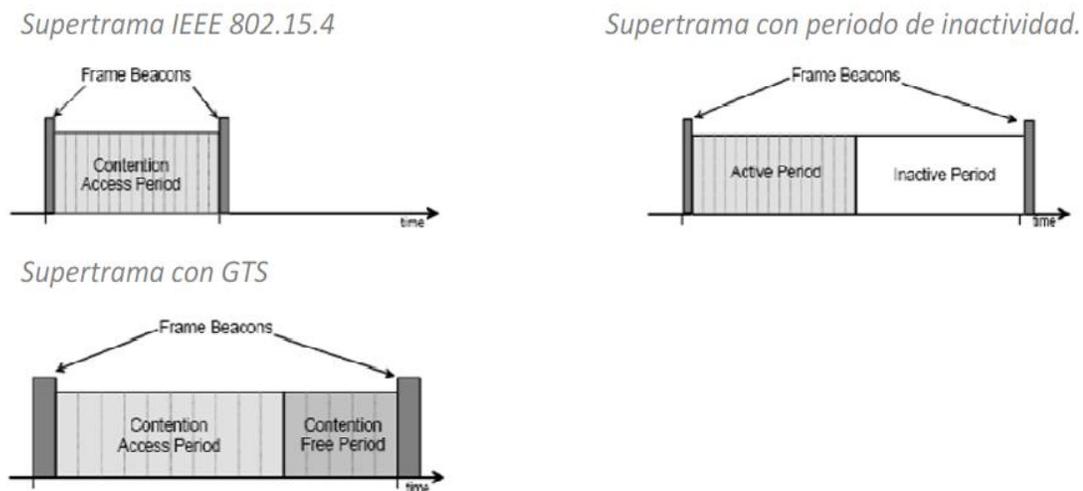


Figura 1.6 Tipos de *super-trama* en el protocolo MAC IEEE 802.15.4

El formato de la *super-trama* es definido por el coordinador. 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). Para aplicaciones con requerimientos específicos de latencia o de ancho de banda, el

coordinador puede dedicar porciones del período activo de la *super-trama* 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 *super-trama*, inmediatamente después de terminado el CAP, tal y como se muestra en la figura 1.6. Un CTS puede ocupar más de una ranura de tiempo.

Durante la *super-trama*, los dispositivos compiten por obtener el canal mediante un sistema de tipo CSMA/CA ranurado. Opcionalmente se puede definir un periodo de inactividad durante el cual los dispositivos pueden entrar en modo inactivo y también existe la posibilidad de utilizar periodos libres de competencia CFP para asignar un ancho de banda a determinadas aplicaciones GTS.

El IEEE 802.15.4 establece 3 tipos de funcionamiento, utilizando *beacon*, no utilizándolos y utilizando *beacon* con GTS. El utilizar un modo u otro de operación lo establece la topología y la aplicación a la que se va a dedicar la red.

- **IEEE 802.15.4 con *beacon*.**

El mecanismo de utilización de *beacon*, consiste en que un determinado nodo, mandará señales de manera periódica, marcando una serie de divisiones de tiempo entre dos *beacons*. En concreto, se establecen 16 ranuras de tiempo. Los nodos que quieran transmitir lo hacen en una de estas ranuras. La señal, indica a un nodo que puede transmitir, si no tiene nada para transmitir se apaga. En el caso de transmitir, espera un periodo de contención aleatorio, de varias ranuras. Tras ese periodo, si el canal está libre, el nodo retransmitirá alineado con la siguiente ranura de tiempo. La sincronización permite que varios nodos puedan transmitir al mismo tiempo, reduciendo las colisiones, intentos de retransmisión, etc.

El Coordinador PAN se encarga de transmitir los *beacon* cada cierto tiempo, entre *beacon* y *beacon* se establece una super-trama compuesta de 16 ranuras de tiempos. Al periodo que ocupan los 15 ranuras libres que hay entre *beacon* se les llama CAP, en ellos los dispositivos pueden transmitir de forma coordinada (ver Figura 1.5). En este caso, como mecanismo de acceso al medio se utiliza CSMA/CA ranurado en donde las ranuras están alineadas con el comienzo de un *beacon*. Los únicos paquetes que no están sometidos a CSMA/CA son los ACK y los *beacon*.

- **IEEE 802.15.4 sin *beacon*.**

Aquí el mecanismo de acceso al medio es CSMA/CA no ranurado, esto implica que los dispositivos transmiten en el momento que es necesario sin esperar ningún *beacon* del coordinador PAN. Su mecanismo de funcionamiento es el siguiente: cada vez que un dispositivo quiere transmitir, espera un tiempo aleatorio, si encuentra el canal libre espera un tiempo de retiro, pasado este tiempo intenta transmitir. Si el canal siguiera ocupado después del período de retiro volverá a esperar otro período aleatorio de tiempo y otro de retiro.

- **IEEE 802.15.4 con *beacon* y GTS.**

Esta tercera modalidad pretende proporcionar una latencia mínima para dispositivos que necesiten tener este parámetro garantizado. Los GTS se definen en la trama *beacon* y se sitúan dentro del periodo de libre contención. Este espacio es reservado para que en caso de haber mucho tráfico, ciertos dispositivos tengan siempre prioridad de utilizarlo para lograr así una mínima latencia (véase Figura 1.5).

El coordinador se encarga de la organización de los nodos de la red. Los nodos RFD se asocian a un coordinador en las dos topologías. Los nodos FFD pueden asociarse y comunicarse con otros coordinadores pero los nodos no pueden asociarse a nodos no coordinadores o RFD. Cada vez que un coordinador se despierta, pone en marcha el mecanismo de *beacon* y envía una señal de red. Este *beacon* informa a los nodos sobre cuánto tiempo va a estar despierto, duración de la super-trama (véase Figura 1.5), y cuando va a volver a mandar otro *beacon*. De esta manera, IEEE 802.15.4 establece tres posibilidades de acceso al medio, el mecanismo de señalizaciones (*beacon*) para el establecimiento de topologías en estrella, un mecanismo CSMA/CA para las topologías punto a punto y, para conseguir que ciertos nodos tengan prioridad, un mecanismo de contención que asegura un periodo de tiempo para estos dispositivos.

En el caso de la topología punto a punto, los nodos FFD tienen que escuchar los *beacon* de los otros nodos para comunicarse con ellos. Estos nodos deben mantener algún tipo de sincronización, pero el cómo se hace está más allá del alcance del estándar 802.15.4.

### 1.3.2 Protocolo Sensor MAC

El protocolo S-MAC [45] pertenece al grupo de protocolos de capa de enlace que utiliza técnicas de contención para acceder al medio. Divide el tiempo en periodos de duración fija, formado por una ventana activa y otra inactiva. La diferencia entre las mismas radica en el estado del radio ya que en la primera se mantiene el transceptor en funcionamiento y en la segunda permanece apagado. Por lo tanto, los nodos se organizan para intercambiar información dentro de sus ventanas activas relativas.

En S-MAC, la duración de las ventanas es fija y única para toda la red. Durante la ventana inactiva, cada nodo “duerme” durante un tiempo determinado. Mientras el nodo duerme, su radio se queda apagada y establece un temporizador para despertarse más tarde. Cuando despierta, es decir cuando entra dentro de la ventana activa, comienza a escuchar el medio para comprobar si otro nodo desea comunicarse con él.

La ventana activa se divide en dos partes. Primeramente se reserva para la emisión y recepción de mensajes SYNC procedentes de los vecinos de la red. Mediante el envío de mensajes SYNC periódicos, un nodo informa a sus vecinos sobre el tiempo restante hasta su siguiente ventana activa. Los tiempos relativos evitan la necesidad de una sincronización temporal global, mientras que la periodicidad de los mensajes varía los efectos de desplazamiento del reloj. La segunda parte se dedica a la recepción de datos, siguiendo un protocolo RTS/CTS/DATA/ACK evitando el problema del nodo oculto.

El protocolo utiliza tres técnicas para conseguir baja potencia en el ciclo de trabajo: sueño periódico, agrupación virtual y escucha de adaptación. Los nodos de la red se despiertan

periódicamente, reciben y transmiten datos, y vuelven a dormir. Al comienzo del período activo, se realiza la sincronización en los intercambios de nodo y la información de la programación con sus vecinos para asegurar que el nodo y sus vecinos despierten al mismo tiempo. Este programa sólo se aprueba a nivel local, lo que resulta en un clúster virtual, lo que mitiga la necesidad de sincronización de todo el sistema. Los nodos que se encuentran en la frontera de dos *cluster* virtuales se unen a la programación de ambos grupos, lo que mantiene la conectividad a través de la red. Después se intercambia la información de sincronización, y los nodos transmiten paquetes utilizando RTS-CTS hasta el final del período en el que se encuentra despierto y los nodos a continuación entran al modo de sueño.

En [46], los autores introducen la escucha de adaptación para reducir latencia. Cuando un nodo escucha un RTS o CTS de su vecino, se despierta brevemente al final de la transmisión. Si el nodo es el siguiente salto de la ruta de datos, despertando al final de la transmisión reducirá la latencia, entonces el paquete puede ser enviado de inmediato sin tener que esperar hasta el próximo período programado en el cual está despierto.

Frente a otros protocolos MAC, S-MAC presenta las siguientes desventajas, alta latencia, insensibilidad para variar cargas de tráfico, dado que RDC es fijo y los paquetes de datos de difusión no usan RTS/CTS lo cual incrementa la probabilidad de colisión.

### 1.3.3 Protocolo Time-out MAC

El protocolo T-MAC [46] está basado en el S-MAC y pretende resolver sus principales deficiencias. Al igual que el S-MAC pertenece al grupo de protocolos basados en contención. La elección del patrón temporal a seguir por los nodos se lleva a cabo de la misma manera que en el S-MAC. En cambio, las ventanas activas no son de duración fija: pueden extenderse, adaptándose así a diferentes tasas de tráfico.

Cada nodo activa su radio en el inicio de la ventana activa y la desactiva si no recibe ningún evento de activación durante un periodo determinado. La recepción de un mensaje es un ejemplo de evento de activación que prolongaría la ventana activa.

Como se observa con el protocolo S-MAC, un ciclo de trabajo fijo consigue reducir el tiempo de escucha inactiva. Sin embargo, una solución de este estilo no es óptima. El problema radica en el hecho de que la tasa de envío de mensaje casi nunca será constante y, normalmente, variará. Si no se desea perder ningún mensaje, el periodo activo de los nodos debe escogerse de manera que sean capaces de soportar la carga máxima esperada. No obstante, siempre que la carga sea menor que su valor máximo, el periodo activo no será el óptimo y, de nuevo, se desperdiciará energía en escucha inactiva.

La novedad que aporta el protocolo T-MAC es básicamente la transmisión de todos los mensajes en ráfagas de longitud variable, yendo a dormir entre ráfagas para reducir aún más la escucha inactiva. Para mantener un periodo activo óptimo bajo carga variable, se determina dinámicamente su longitud. En caso de no escuchar nada en cierto tiempo apagado se da por finalizado el período activo y el nodo se va dormir.

Los nodos se comunican utilizando un esquema RTS/CTS/DATA/ACK, tal y como sucede en S-MAC. Cada nodo escucha y transmite dentro de su ventana o periodo activo. Cuando

no se da ningún evento de activación predefinido, el periodo activo finaliza. Se considera un evento de activación; la ejecución de algún temporizador, la recepción de datos vía radio, la detección de una comunicación vía radio, la transmisión de un paquete de datos o de reconocimiento y el conocimiento de la finalización de un intercambio de datos de algún vecino. Un nodo se va a dormir en caso de estar libre y encontrarse fuera del período activo. Bajo el esquema anteriormente descrito, la comunicación se realiza mediante una ráfaga al principio de cada trama. Dado que entre periodos activos los mensajes deben ser almacenados en un buffer, la capacidad de éste determinará el límite superior del máximo tiempo de trama.

T-MAC introduce FRTS, por sus siglas en inglés es el mecanismo que permite a un nodo notificar a su receptor de destino que no se puede acceder al medio en la hora actual. El mecanismo tiene el potencial de extender la entrega de datos hasta 3 saltos por ciclo. , cuando el nodo pierde contención y recibe un paquete CTS, envía un paquete FRTS a su receptor de destino. El paquete FRTS contiene la longitud de la transmisión de datos actual del nodo, por lo tanto, el receptor de destino puede saber su tiempo para despertar. Sin embargo, los nodos que están más abajo no pueden oír los FRTS y por lo tanto no se despiertan.

El mecanismo por lo tanto no se puede realizar de forma iterativa y un paquete sólo puede ser transmitido por un máximo de 3 saltos por ciclo. Durante el tiempo que pospone su transmisión de datos para la FRTS, un nodo debe transmitir un Data-Send (DS) de paquetes del mismo tamaño de FRTS para evitar que cualquier nodo vecino ocupe el canal.

En general, el protocolo T-MAC dispone también de una opción para evitar la sobre-escucha. Sin embargo su efecto colateral, aumentan las colisiones, haciendo que el *throughput* máximo decrezca. Por lo tanto, aunque evitando la sobre-escucha se ahorra en potencia, este mecanismo no debe ser usado cuando se requiera *throughput* máximo. Presenta también problemas cuando el tráfico es unidireccional ya que el nodo se va prematuramente al estado de dormir y por ello no puede recibir el mensaje RTS del nodo que quiere enviárselo, este problema se conoce como durmiendo temprano (*sleeping early*).

#### 1.4 Consideraciones finales del capítulo

En el capítulo 1 de la investigación se han abordado los temas que establecen el marco teórico en el cual se desarrolla la misma. Por tanto, se describen las características fundamentales de las WSN, haciendo especial énfasis en las limitaciones que tienen los dispositivos con los que se trabajan en ellas. Luego se han descrito las características de la capa MAC en WSN, concluyendo con la necesidad de diseñar protocolos MAC específicos que sean eficientes en el consumo de energía. Se incluyen también en este capítulo el estándar IEEE 802.15.4, y los protocolos en estudio de esta presente investigación, S-MAC, T-MAC y IEEE 802.15.4. Con la descripción general y el modo de funcionamiento

de los protocolos antes mencionados se puede constatar que los mismos favorecen de una forma u otra su aplicación en las WSN por estar orientados a dispositivos de bajos recursos y soportar los patrones de tráfico más comunes en las WSN.

---

## CAPÍTULO 2

### Protocolos MAC en Castalia/OMNeT++ y escenarios de simulación

En el presente capítulo se describen las características fundamentales de algunos simuladores para WSN, la elección del Castalia/OMNeT++ como simulador y el desarrollo de los escenarios de trabajo que sirven a la comparación posterior en el capítulo 3. Para ello en la sección 2.1 se hace una descripción general de algunos simuladores específicos para las WSN a partir de sus características propias, así como sus principales inconvenientes. A continuación, en la sección 2.2, se abordan las principales características de la plataforma Castalia/OMNeT++ que la hacen muy importante en la presente investigación. En la sección 2.3, se definen los escenarios de simulación. Finalmente, la sección 2.4 resume algunas consideraciones finales del capítulo.

#### 2.1 Simuladores para WSN

Un simulador es una herramienta que trata de imitar el comportamiento de un sistema. Es posible distinguir entre dos tipos de simuladores: Simuladores basados en tiempo continuo y simuladores de eventos discretos. En una simulación de tiempo continuo, el comportamiento del sistema está representado por ecuaciones diferenciales y la simulación consiste en la solución del sistema de ecuaciones. En una simulación de eventos discretos, el comportamiento del sistema se describe como una serie de eventos que deben ser tratados en un punto discreto del tiempo de simulación y que toman una cierta cantidad de tiempo real. Estos eventos son gestionados por un planificador de eventos que permiten, generalmente, simulaciones fuera de línea. No obstante, algunos simuladores integran planificadores de eventos en tiempo real que puede utilizar como entrada de datos el resultado de una aplicación o de una red real y ofrecer como salida unos datos que pueden ser enviados a una aplicación especializada o re-inyectados en la red real.

Dependiendo del simulador utilizado, la descripción del escenario y el comportamiento del escenario pueden llevarse a cabo desarrollando un *script* o un fichero de código específico o, de una manera más sencilla, utilizando una interface gráfica de usuario. Otros simuladores proponen la generación directa del escenario utilizando algoritmos concretos u otra herramienta auxiliar.

Uno de los factores cruciales en la elección de una herramienta es el costo de la licencia, cuando ésta es de tipo comercial. A continuación, se presenta una serie de parámetros de comparación que sirve como guía para evaluar algunas de las herramientas de simulación más usadas en el ámbito investigativo; así el usuario final cuenta con la fundamentación necesaria para elegir la herramienta que mejor se adapte a sus necesidades.

Los siguientes parámetros permiten elegir una herramienta de simulación para un uso específico, en determinada área de telecomunicaciones. En cada caso, se define el parámetro y la manera cualitativa para su medición [30].

### **Uso investigativo**

Este parámetro tiene como finalidad establecer niveles para comparar el uso de las herramientas de simulación en áreas académicas e investigativas, con el fin de explorar los aportes que han logrado las diferentes comunidades respecto de su uso, y hacer un primer acercamiento que permita identificar las principales implementaciones de red en que son usadas.

### **Tipo de licencia**

Para efectos prácticos, dependiendo del tipo de licencia de la herramienta, ella puede tener habilitadas todas sus funciones o solo un grupo de ellas; esto también puede ir ligado con el valor que se cobre por la licencia. Con base en lo anterior, la forma de categorizar los tipos de licencias es libre o comercial, la primera no es necesariamente una herramienta gratuita, sino que le permite al usuario editar, copiar, ejecutar, distribuir y hacerle mejoras y la segunda se refiere a las licencias que tienen restricciones para el usuario, teniendo en cuenta que su comercialización, costo, duración de uso, edición y libertad de permisos, son controlados y definidos por los propietarios de la herramienta.

### **Curva de aprendizaje**

Por medio de este parámetro, se busca catalogar el nivel de exigencia de la herramienta para lograr su manejo adecuado. Es un parámetro de suma importancia. Su medición considera diversos aspectos esenciales, conocimientos previos, puesto que el contexto son las redes de comunicación, es de vital importancia conocer aspectos básicos en lo referente a protocolos y estándares de red para enfrentarse a una herramienta potente. Por otra parte, dado que las herramientas de alto rendimiento permiten la introducción de código, es importante tener conceptos básicos de programación y el uso didáctico de la herramienta ya que existe una gran variedad de simuladores que, en términos de interacción, son sumamente amigables con el usuario, ya que permiten configurar elementos de red de una manera intuitiva, permitiendo observar solo las características básicas del contexto de red; por esta razón, son usados como herramientas didácticas para la iniciación de los estudiantes en los cursos de redes.

### **Plataformas que lo soportan**

Este parámetro es descriptivo. Lista los diferentes sistemas operativos en los cuales la herramienta puede correr sin ningún problema. Los sistemas operativos que se tendrán en cuenta son: Windows y Linux.

### **Interfaz gráfica**

Con este parámetro se busca definir la cercanía que tiene la herramienta con el usuario y las facilidades que le presta. Puede requerir de un nivel de programación mínimo, ya que la herramienta tiene la disposición de trabajar desde todas sus perspectivas con una interfaz gráfica o implementa una interfaz gráfica que facilita su uso, pero lo hace de forma limitada; algunas de sus implementaciones deben definirse mediante programación o no cuenta con interfaz gráfica alguna.

## Gráficas de resultados

Las herramientas de simulación se utilizan para recrear el funcionamiento de la red de la manera más real posible. Para ello es necesario realizar medidas de ciertas variables de red, con el fin de realizar un análisis posterior de los datos y comprender así el comportamiento de la red ante diferentes eventos o posibles configuraciones. Una manera de interpretar y analizar los datos de las variables medidas es graficándolos de diversas formas.

## Tecnologías y protocolos de niveles 2 y 3 que soporta

Parámetro de índole descriptivo en el cual se listan las tecnologías y protocolos de nivel 2 y 3 del Modelo OSI que soporta. Algunas herramientas no soportan todos los protocolos, lo que hace necesaria su implementación generando código o adaptando componentes preexistentes. De este modo se quiere clasificar los simuladores de acuerdo con la variedad de protocolos que permiten simular.

## Tráfico que permite modelar

Este es un parámetro muy importante porque permite establecer los tipos de aplicaciones, servicios o protocolos que la herramienta está en capacidad de simular. Esto va muy ligado con el comportamiento de la aplicación, en el sentido de cómo genera los datos a utilizar en la simulación, lo cual está ligado a una distribución estadística que se puede *parametrizar* en la herramienta, tanto para las aplicaciones que ella dispone, como para aplicaciones que el usuario pueda ajustar dependiendo de sus necesidades.

Una vez definidos los parámetros de comparación, se procede a su evaluación en las diferentes herramientas de simulación, con el fin de establecer un cuadro comparativo que le permita al usuario visualizar, de una manera clara, las ventajas y desventajas de elegir una herramienta u otra.

### 2.1.1 NS-2

Como se presenta en [24], NS2 es una de las herramientas de código abierto más confiables y de mayor uso para la implementación de proyectos en simulación, ya que sus posibilidades de uso, su disponibilidad al público y, adicional a esto, sus características, permiten que una gran cantidad de usuarios puedan realizar diversos tipos de trabajo sobre ella.

En relación con la libertad de disposición que tiene el simulador, se argumenta la disponibilidad del código fuente tanto para su inspección y modificación, como la libertad para la aplicación por parte de cualquier usuario. Esto ha promovido la generación de módulos, al interior de la comunidad, que permiten la creación de nuevos protocolos y sistemas para ser simulados. A su vez, su característica de licencia libre ha permitido expresar tanto las preocupaciones sobre la herramienta, como sobre su influencia positiva.

NS2 es un simulador con limitadas características gráficas. Está orientado a programación, aunque se han hecho intentos de simulación gráfica para aprovechar la potencia de la herramienta, intentando graficar las rutas de los paquetes, implementando la herramienta

NAM. Por esta razón, NS2 es una herramienta catalogada con un bajo nivel de características gráficas.

Aunque el software no contiene una herramienta que retorne gráficas de una manera eficiente, existen otras herramientas que permiten hacerlo, lo cual minimiza el problema y permite aprovechar todos los valores que arroja el simulador de las tecnologías manejadas a nivel 2 y 3 de OSI y definen tecnologías que la herramienta puede simular (i.e..., TCP/IP, UDP, FTP, RTP, SRN, GPRS, IPv6 móvil, RSRV, MPLS), así como redes ad hoc, WLAN, Mobile-IP, UMTS e Inalámbricas. Un aspecto a favor de la herramienta de simulación es su capacidad de instalación en los diversos entornos y plataformas (i.e., FreeBSD, Linux, SunOs, Solaris, Windows y Mac OS X).

### 2.1.2 OPNET Modeler

OPNET Modeler [48] es una herramienta de simulación que permite flexibilidad y escalabilidad en modelos jerárquicos, puede ser implementada en sistemas operativos tipo Unix o Windows. Dichos modelos, están divididos en tres dominios, denominados Red, Nodo y Procesos, los cuales están escritos en C++ y poseen su propio editor.

Gracias a sus numerosas ventajas y a su poderosa interfaz gráfica, su uso, por parte de grupos académicos es alto, puesto que la manera de simular es muy intuitiva; sin embargo, necesita de gran cantidad de conocimientos previos en redes y programación, por lo que su curva de aprendizaje es alta. De otro lado, aunque la licencia del simulador es comercial, existe una versión de este software que no genera cargos económicos, aunque su uso está limitado a actividades netamente académicas.

OPNET cuenta con características que permiten el estudio de los resultados de simulación. Específicamente, el servicio de análisis consiste en mostrar la información de los resultados de simulación en forma de gráficos, presentados dentro de áreas rectangulares llamadas paneles de análisis, los cuales tienen propósitos específicos para presentar o transformar la información. Estos paneles, básicamente, contienen gráficas cartesianas que describen la relación entre diferentes variables. En cuanto a las tecnologías de nivel 2 y 3, hay varias que la herramienta soporta, aunque el simulador no soporta modelos de energía, importantes para las WSN.

### 2.1.3 GNS3

GNS3 [34] es software gráfico de simulación de red que permite la emulación de redes complejas. Trabaja de manera similar a reconocidos emuladores como Vmware o Virtual Box, emulando los IOS de los dispositivos de inter-conectividad de Cisco. *Dynamips*, el núcleo de este software, es el que permite esta tarea. La herramienta corre en ambientes Linux, Windows y Mac.

GNS3 no toma el lugar de un *router* real, pero es una herramienta para el aprendizaje y preparación para certificaciones Cisco como CCNA, CCNP y CCIE. Su interfaz gráfica es muy intuitiva para el usuario. La licencia de esta herramienta es de libre descarga, pero

necesita de las imágenes de los dispositivos Cisco para emular su comportamiento, imágenes que se deben adquirir directamente con el fabricante.

### 2.1.4 NS-3

Esta herramienta como se presenta en [26] y es un simulador de eventos discretos de red, que tiene como principales objetivos lograr un mayor énfasis en los niveles 2 y 4 del OSI y que su uso sea principalmente educativo. Cabe mencionar que no se encuentran publicaciones referentes a la herramienta tan fácilmente. En un principio la compatibilidad con NS-2 no es un objetivo del proyecto, por lo que NS-3 no es una actualización de NS-2 sino un proyecto diferente. Esta herramienta es código abierto y permite la inclusión de otro software de código abierto; es escalable, modular y emulador.

En relación con la usabilidad y adaptabilidad, NS-3 está escrito solo en C++ lo que lo hace más fácil de depurar. Las plataformas que soporta esta herramienta, tanto de escritorio como de servidor, son: Linux, OS X, FreeBSD, Solaris y Windows.

La interfaz gráfica de esta herramienta soporta algunas formas de animación visual para todo o parte de una simulación. Es una herramienta útil para depurar y mostrar la simulación a terceros. Usa NAM para la animación del escenario de red, que es parte de NS-2 desde el principio, y ha logrado hacer una extensión para ambientes inalámbricos. Para la generación de resultados, indican que NS-3 proporciona objetos de soporte para facilitar la recolección de datos durante la ejecución de la simulación, una característica también incluida desde NS-2. NS-3 se extiende incluyendo objetos para histogramas, rastreo, funciones de distribución y secuencias versus tiempo.

Respecto a las tecnologías, NS-3 permite simulaciones sobre IPv4 e IPv6, Wireless (e.g., WiFi, Wimax) y algoritmos de enrutamiento (e.g., OLSR y AODV).

### 2.1.5 OMNET++

Esta es una herramienta de simulación de eventos discretos. Tal como especifican en [32][37], la motivación para el desarrollo de OMNET ++ fue producir una herramienta de código abierto poderosa que pudiera ser usada por la academia, en educación o investigación, y que fuera una alternativa a las herramientas comerciales, para ser implementada en sistemas tipo Unix, MAC y Windows. Incluso, haciendo uso de Cygwin o el compilador de Microsoft Visual C++, es posible portar la herramienta en otros sistemas con menor esfuerzo. Esta herramienta se conforma por módulos escritos en C++ que se comunican entre sí a través de mensajes, donde módulos simples pueden conformar módulos compuestos y los niveles jerárquicos no tienen límites.

Este software ha estado disponible desde septiembre de 1997 y, fuera de las descargas anónimas, alrededor de cuarenta universidades a nivel mundial han obtenido la herramienta para su uso, indicando áreas de aplicación que van desde tecnologías móviles, inalámbricas hasta ATM y redes ópticas, realizando proyectos relacionados con el desarrollo de modelos de TCP/IP.

Se debe tener en cuenta que, a pesar de que la herramienta de simulación presenta muchos beneficios, los módulos que la conforman no están del todo desarrollados, lo cual implica que los programadores deben modificar el código existente o realizar implementaciones de módulos nuevos para cubrir componentes de red que aún no están especificados dentro del paquete OMNET; esto hace que la curva de aprendizaje de la herramienta sea alta, pues modificar el código fuente de los componentes de red no es una tarea sencilla.

La interfaz gráfica que ofrece la herramienta presenta características de depuración superiores al de otras herramientas. OMNET++ es un simulador con visualización en línea, lo que permite que los usuarios puedan pausar la simulación e inspeccionar –o cambiar– los valores de los módulos que conforman una red, incluso cambiar la apariencia de los nodos y datos que arroja como resultado, para ser analizados con herramientas estadísticas. Sin embargo, si el módulo no está desarrollado en alguna librería de OMNET++, será necesario generarlo mediante código; la interfaz gráfica, en ese caso, se reduce a un editor de texto.

Respecto las gráficas de los resultados, permite apreciar que las opciones gráficas de parámetros son adecuadas para mostrar los resultados obtenidos de manera clara. Con relación a las tecnologías de nivel 2 y nivel 3 que soporta la herramienta, diversas publicaciones muestran diferentes protocolos e implementaciones realizadas.

En la Tabla 2.1 se observa una comparativa entre los diferentes simuladores por cada punto mencionado en la sección 2.1

Tabla 2.1 Comparación entre algunos simuladores para WSN

	<b>OPNET</b>	<b>OMNET</b>	<b>NS-3</b>	<b>GNS3</b>	<b>NS-2</b>
<b>Uso investigativo</b>	Alto	Alto	Medio	Bajo	Alto
<b>Tipo de licencia</b>	Comercial	Libre	Libre	Libre/Comercial	Libre
<b>Curva de aprendizaje</b>	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto
<b>Plataforma que soporta</b>	Windows, Unix	Window, Unix	Windows, Mac, Unix	Linux, Mac, Windows	Windows, Mac, Unix
<b>Interfaz gráfica</b>	Alto	Medio	Medio	Alto	Bajo
<b>Gráficas de resultados</b>	Buena	Aceptable	Aceptable	Limitada	No tiene
<b>Tecnología de nivel 2 y 3 que soporta</b>	Alto	Alto	Medio	Bajo	Alto
<b>Tráfico que permite modelar</b>	Alto	Medio	Medio	Nulo	Alto

## 2.2 Selección de Castalia/OMNeT++

A fin de realizar la simulación de la red de comunicación establecida para analizar el desempeño de los protocolos MAC, se propone emplear el programa OMNET++. Este sub-epígrafe presenta a este programa como una herramienta para la simulación no sólo de una red ante un ambiente hostil, sino también para simular la función que desempeñará la capa MAC en la red presentada para dicha simulación.

Los requisitos funcionales del simulador se muestran en la Tabla 2.1 la cual muestra la comparación entre las diferentes herramientas de simulación, teniendo en cuenta los parámetros definidos anteriormente en la sección 2.1 y permite guiar al usuario en el proceso de selección y toma de la decisión que mejor se ajuste a sus requerimientos[20].

Los requisitos básicos para la herramienta elegida se pueden clasificar en dos conjuntos diferentes, el primero para características de carácter general de la herramienta y el segundo para características específicas con respecto a las WSN.

Los principales requisitos para la elección de la herramienta de simulación en el marco del presente proyecto han sido:

- Debe ser una herramienta basada en código abierto, que permita hacer modificaciones en el núcleo del programa sin costes de licencia en caso de que sea necesario.
- Fácilmente integrable con otra herramienta, para ello es necesario que los datos de entrada y salida estén en un formato estándar
- Conocido y utilizado en la actualidad por la comunidad científica, y con una actividad reciente en actualizaciones o nuevas versiones
- Flexibilidad en cuanto a la forma en la que se describen los modelos.

Disponibilidad de modelos o que estos sean de fácil desarrollo de los siguientes elementos:

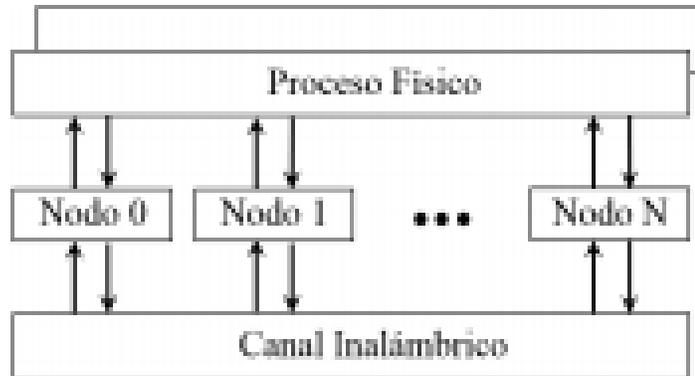
- Modelos del canal de comunicaciones
- Modelos del canal de *sensado*
- Modelos del hardware
- Modelos de consumo
- Modelos de obstáculos en el medio.
- Capacidad para manejar objetos (nodos) móviles

Ahora bien, la herramienta OMNET++ por sí sola no se ajusta a las necesidades del proyecto, esto por la cantidad y la densidad de información en las redes de sensores, el cambio abrupto en los datos, el bajo consumo de potencia y la distribución y configuración que presentan los nodos que componen a la misma. En proyectos de investigación pasados, otras entidades educativas han dado solución a este problema creando la herramienta de simulación Castalia como complemento de OMNET++.

Castalia [17] es un simulador específicamente para redes inalámbricas de sensores, redes de área corporal y cualquier otra red afín en la que se utilice un consumo bajo de potencia.

Está basada en OMNET++ y puede considerarse como una extensión de este que al igual que su software base, es de código abierto.

El funcionamiento global de Castalia comprende la formación de nodos que representan los dispositivos sensores dentro de la red, según se puede apreciar en la figura 2.1 Además, se generan los módulos canal inalámbrico y proceso físico que emulan el medio de propagación de las señales (aire generalmente) y los procesos físicos dentro de la red, respectivamente.

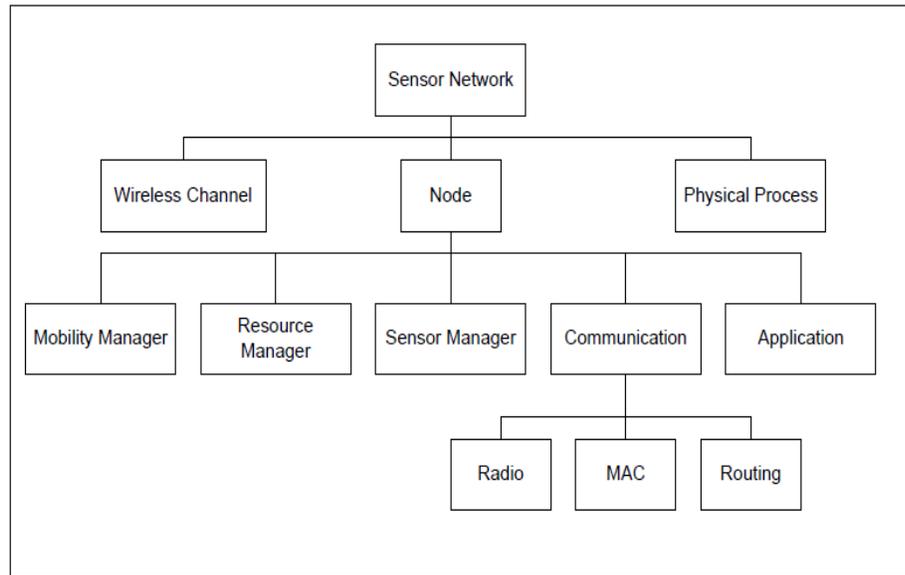


**Figura 2.1** Modelo de estructura básica de Castalia [18]

Cada uno de los bloques dentro de la figura 2.1 representan un módulo (archivo de extensión .ned) de OMNeT++ y cuyo código fuente fue generado por los desarrolladores de Castalia para crear un simulador orientado a redes de sensores.

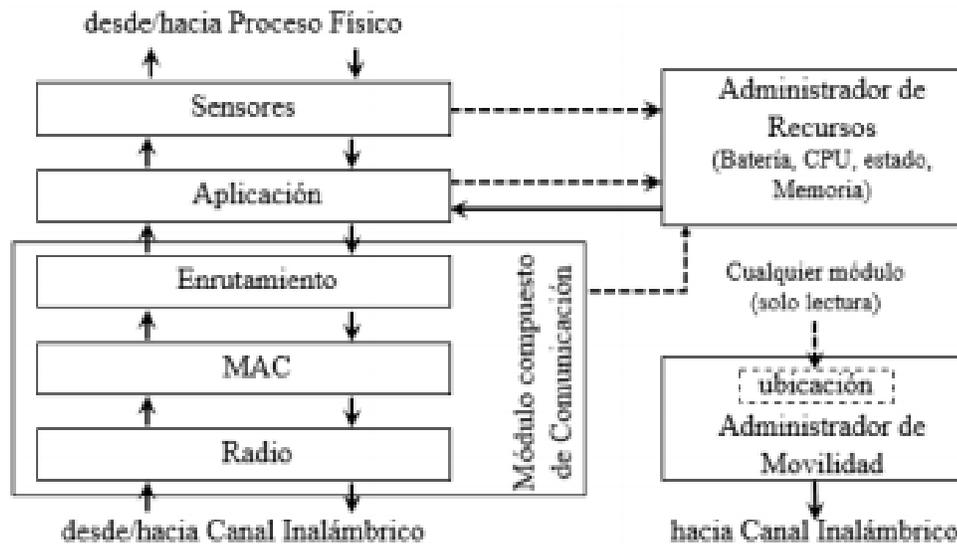
Se puede resumir entonces que Castalia hace uso de las interconexiones de OMNeT++ (por medio de la generación de archivos con extensión .ned) para generar redes inalámbricas, de bajo consumo en su mayoría, configurando un número determinado de nodos y su distribución espacial y temporal para luego interconectarlos utilizando los módulos inalámbrico y físico, según las especificaciones del usuario. Castalia, además, compone el código fuente incorporado a cada módulo la regulación y funcionamiento de la red.

La jerarquía de los archivos tipo *ned* se presenta en la figura 2.2. Cada uno de estos módulos posee su propio código fuente que determina su funcionamiento. Nótese que Castalia creará un número de módulos nodo (tipo *ned*) igual al número de dispositivos de sensores especificados por el usuario.



**Figura 2.2** Jerarquía de módulos tipo *ned* de OMNeT++ utilizado por Castalia [18]

Para adentrarse en la estructura de Castalia se debe comprender el funcionamiento de los módulos que emularán los dispositivos o nodos que componen la red. Para esto se deben conocer los módulos dentro de cada nodo, los sub-módulos dentro de estos si los hubiera y las interconexiones entre estos y con el exterior. Dentro de cada nodo se tiene la estructura que se presenta en la figura 2.3.



**Figura 2.3** Estructura de los nodos de *sensado* en Castalia [18]

El módulo de comunicación comprende las tres funciones básicas de la comunicación inalámbrica: el enrutamiento, el control de acceso al medio y el manejo físico del canal; los

cuales son manejados por los módulos de ruteo, MAC y radio, respectivamente. El módulo de movilidad maneja la posición del nodo en ambientes en donde estos dispositivos se encuentren en movimiento. Las tareas que el nodo realizará se incorporarán por medio del módulo de aplicación y, si la tarea lo necesita, por el módulo de manejo de sensores. Finalmente, el módulo de administrador de recursos como su nombre lo indica se encarga de calcular el energía que el nodo ha consumido en su operación y la capacidad de memoria con que este cuenta para sus funciones. Todos los módulos y sub-módulos dentro de cada nodo pueden ser modificados a conveniencia al realizar la simulación por medio de los archivos de configuración *omnetpp.ini*. De esta manera, con la misma herramienta es posible simular nodos sensores cuya aplicación sea monitorear un convertidor analógico digital o enviar paquetes de manera periódica cambiando el módulo de aplicación.

### 2.2.1 Análisis de herramienta Castalia y Model de Simulación

El código fuente para el simulador Castalia fue generado hace poco tiempo, relativamente. Es por esta razón que antes de cualquier diseño o implementación se debe conocer en detalle el funcionamiento de los módulos de Castalia para así poder vincular los requerimientos y limitaciones del proyecto con lo que puede ser realizado por medio de Castalia.

Este análisis se inicia con la lectura del manual de usuario [18], en el cual mencionan las funciones de los diferentes módulos y su relación con otros módulos o sub-módulos. Además, se detallan los principales comandos para la ejecución de archivos de configuración o “omnetpp.ini” los cuales son usados por Castalia para generar cada uno de los nodos con sus diferentes funciones dentro de la red.

Seguidamente, se realiza una lectura exhaustiva de los archivos de código fuente C++ que componen Castalia para entender su funcionamiento y a la vez documentar dicho código.

#### Descripción global de Castalia

Por medio del análisis de la herramienta Castalia se logra concretar que el funcionamiento básico de este simulador consiste en la interrelación de módulos como se observa en la figura anterior. Utilizando código fuente se definen las funciones de los módulos. Estas funciones pueden variar según la clase que se escoja. Cabe destacar además que existen otras clases auxiliares, utilizadas por cada uno de los bloques de la figura 2.2, independientemente del módulo de función que se pretende emular.

Así, todos los módulos desarrollados para emular la capa MAC (sean el TMAC, SMAC, MAC80154 o cualquier otro desarrollado) utilizan las funciones de la clase auxiliar *VirtualMac.cc* para trabajar correctamente. Esto se aplica equivalentemente para los demás módulos que se explican a continuación.

De manera general, el modelo de simulación sigue la estrategia definida por Castalia, ilustrada en las figuras 2.1 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 2.2. 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 importante de observación.

Tabla 2.2: Parámetro generales de la red

Parámetro	Valor
Tiempo de simulación	1501 segundos
Dimensiones del terreno	30 x 30 metros
Despliegue	Uniforme

### 2.2.2 Módulo de 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.  $PL_{(d_0)}$  son las pérdidas del trayecto para una distancia de referencia  $d_0$ ,  $\eta$  es el exponente de pérdidas del trayecto,  $d$  es la distancia entre emisor y receptor, y  $X_\sigma$  es una variable aleatoria gaussiana de media cero con desviación estándar igual a  $\sigma$ . El valor de  $\sigma$ , 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 2.3.

Existe otro parámetro relacionado con las pérdidas del trayecto, denominado sigma bidireccional ( $\sigma_{bd}$ ), 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  $\sigma$  y  $\sigma_{bd}$  deben ponerse a cero. En la 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.

Tabla 2.3: 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
$\sigma$	4.0
$\sigma_{bd}$	1.0
Umbral de señal	-100 dBm

### 2.2.3 Módulo de Aplicación

Los desarrolladores de Castalia ya han creado módulos de aplicación que realizan diferentes tareas. Se desea comprobar el funcionamiento de los nodos tanto en conectividad (capacidad de los nodos en comunicarse entre ellos, sin importar el contenido de los mensajes) como en confiabilidad de los mensajes. Para esto se adapta un parámetro de configuración inicial en el módulo de aplicación llamado función que se encarga de indicarle al nodo si debe enviar periódicamente tramas sin un contenido definido (pruebas de conectividad) o si debe incorporar a estas tramas datos obtenidos por el módulo de sensores.

El módulo de aplicación forma parte del consumo de energía que tendría el micro-controlador en los nodos reales. Buscando que la solución se adapte al modo de programación de Castalia se utiliza la lectura desde un archivo de texto de los parámetros del dispositivo que en la realidad contendría al módulo de aplicación de manera que se pueda cambiar de forma sencilla el componente (el micro-controlador en este caso) con el que se desea simular el funcionamiento del nodo. De esta forma, se puede variar el micro-controlador que realizaría las funciones de aplicación del nodo sin alterar el código en Castalia.

Es posible tener varios modos de consumo de energía. En este caso se toman los modos de consumo normal de energía y el modo de consumo inactivo del micro-controlador para estados de reposo con los que se busca emular el ahorro energético de los nodos. Esta misma caracterización puede ser implementada con otras frecuencias de operación del micro-controlador, siempre y cuando los datos incorporados en el archivo de parámetros sean congruentes con lo estipulado por el fabricante del dispositivo.

Para buscar el correcto funcionamiento del módulo en términos de manejo de potencia se utiliza la misma premisa que en los nodos reales en donde al realizar alguna tarea el dispositivo se encuentra en el modo de consumo normal y al no tener ninguna función que realizar (en reposo) el modo cambia a inactivo.

El aspecto fundamental de la presente investigación es el análisis del desempeño de los protocolos IEEE 802.15.4, T-MAC y S-MAC 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 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 *packetrate*, 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 2.4.

Tabla 2.4: Parámetros del módulo de Aplicación

Parámetro	Valor
Nombre de la aplicación	<i>ThroughputTest</i>
Demora inicial	1 segundo
Máximo valor del histograma de latencia	20000 ms
Cantidad de contenedores del histograma de latencia	40
Carga útil de datos	100 bytes
Cabecera de paquete	5 bytes

### 2.2.4 Módulo MAC

Entre los módulos de control de acceso al canal que ya se han desarrollado para Castalia se encuentra el módulo de protocolo de comunicación según el estándar IEEE 802.15.4. Este módulo está implementado con las siguientes especificaciones:

- Funcionalidad CSMA-CA (segmentado y sin segmentar)
- Asociación a PAN por medio de los beacon (auto asociación)
- Transmisión de datos de forma directa
- GTS

Sin embargo, no se han implementado la generación de los *beacon* secundarios y el flujo de información a través de diferentes PAN (multi-salto) por lo que el módulo debe reestructurarse para adaptarlo al proyecto. Se debe recordar que los nodos en Castalia son únicos, o sea que no hay distinción o módulos diferentes entre nodos FFD y RFD, por lo que esta diferenciación debe hacerse por medio de los parámetros de inicialización de cada nodo en Castalia.

En el caso de los súper encapsulados secundarios se debe comprender que el tiempo del periodo activo no es el mismo que el tiempo del periodo activo del súper encapsulado principal pues de ser así ambos encapsulados interferirían entre sí. Para evitar esto, el encapsulado activo secundario debe ser más pequeño. La forma de conseguir esto es por medio del fraccionamiento del parámetro *frameOrder* que determina el intervalo del tiempo activo. Generalmente este fraccionamiento se realiza entre número que sean múltiplos de dos.

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 250Kbps, 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 2.5.

Para los protocolos T-MAC y S-MAC el módulo MAC es muy sencillo solo se utilizan los parámetros *listenTimeout*, *disableTAextension*, *conservativeTA* el resto se utiliza por defecto.

Tabla 2.5: Parámetros del módulo MAC

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

### 2.2.5 Módulo Radio

Se menciona previamente que la solución implementada por los desarrolladores de Castalia para la parametrización de los dispositivos de transmisión/recepción consiste en la utilización de archivo de texto lo que le da más versatilidad al simulador. Esta solución se ajusta perfectamente a lo necesitado en este proyecto.

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 0dBm 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*. El utilizado es 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 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 2.6.

Tabla 2.6: Parámetros del módulo de Radio

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

## 2.3 Escenarios de simulación

Para la realización de la presente investigación se diseñan escenarios de simulación correspondientes a cada una de las características de la red cuyo efecto se va a explorar.

Estas características son las siguientes:

- Carga de tráfico de la red
- Densidad de nodos en la red (DN)

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.

### 2.3.1 Escenario 1

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 super-trama 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 configuraciones específicos de este escenario de simulación se muestran en la tabla 2.7, 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  $R_p = 7 \text{ paquetes/segundo}$  se pueden considerar altas y tienden a saturar la red. Los resultados de la simulación de este escenario confirman esta afirmación.

Tabla 2.7: Parámetros del escenario de simulación 1

Parámetro	Valor
Tiempo de simulación	1501 segundos

<b>Área de despliegue</b>	30x30 metros
<b>Tamaño de los paquetes</b>	125 bytes
<b>RDC</b>	25%
<b>Cantidad de nodos</b>	20
<b>Razón de paquetes por nodo</b>	(0.25,0.5,0.75,1,1.5,2,2.5,3,4,5,6,7)paquetes/segundo
<b>Razón de bits por símbolo</b>	2 bit/símbolo

### 2.3.2 Escenario 2

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 DN se mantiene un tamaño constante del área de despliegue de la red y se aumenta la cantidad de nodos que la componen con intervalos en cada corrida de la simulación. Se utilizan varios valores de Rp 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 2.8, el resto de los parámetros de la simulación se mantienen con los valores mostrados en la sección 2.2

Tabla 2.8 Parámetros del escenario de simulación 2

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
<b>Tiempo de simulación</b>	1501 segundos
<b>Área de despliegue</b>	30 x 30metros
<b>Tamaño de los paquetes</b>	125 bytes
<b>RDC</b>	25%
<b>Cantidad de nodos</b>	(5,30,50,70,110,150) nodos
<b>Razón de paquetes por nodo</b>	(0.5,1.25,2)
<b>Bits por símbolo</b>	2 bit/símbolo

## 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++ por sus facilidades de implementación con códigos

existentes dentro de sus módulos, 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 dos escenarios de simulación a partir de los cuales se examina el desempeño del protocolo MAC IEEE 802.15.4 bajo diferentes condiciones de tráfico y densidad de nodos en comparación con los protocolos S-MAC y T-MAC.

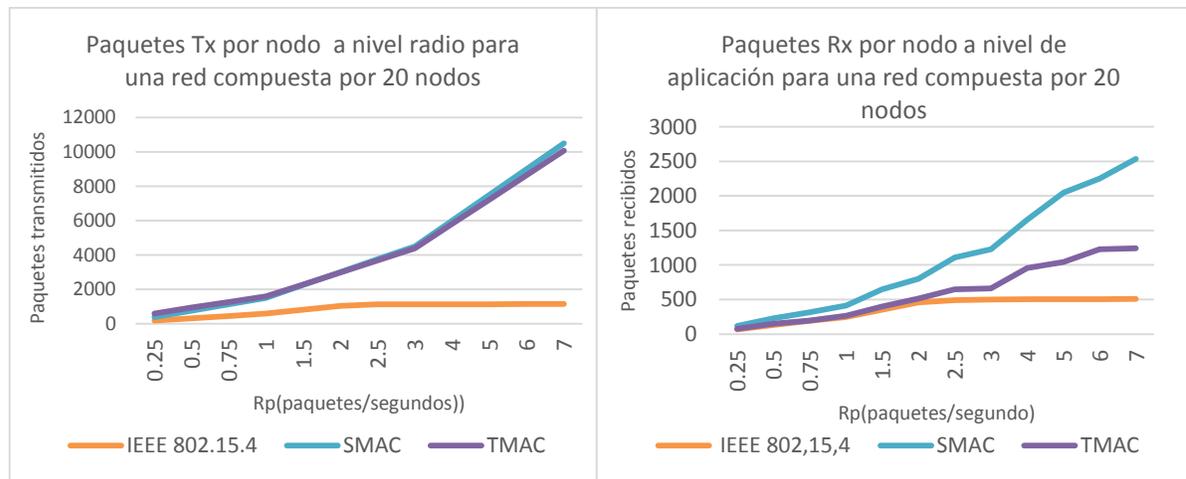
## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se explican los resultados obtenidos en los escenarios de simulación descritos anteriormente y se discuten los gráficos que nos brindan las simulaciones. Para llegar a los resultados se utiliza *CastaliaResults* y se grafican en Excel para asimilar mejor los datos aportados que este *script* provee. En la discusión de los resultados se lleva a cabo la comparación entre los protocolos IEEE 802.15.4, S-MAC y T-MAC a partir del comportamiento de la red ante las diferentes condiciones simuladas en los escenarios. Finalmente, se realiza una conclusión final acerca de cuál protocolo es más eficiente a partir de su desempeño ante las condiciones de carga de tráfico y densidad de nodos.

#### 3.1 Escenario 1: Carga de tráfico

La simulación de este escenario es indispensable no solo para evaluar el desempeño de los protocolos 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 3.1 (a) y de paquetes recibidos a nivel de aplicación 3.1 (b). 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 una red compuesta por 20 nodos. En estas gráficas se puede apreciar que, por ejemplo, para una red compuesta por 20 nodos en un área de despliegue de  $900\text{m}^2$ , el valor de  $R_p = 0,5$  paquetes/segundo genera una carga de tráfico baja;  $R_p = 1$  paquete/segundo, carga media; y valores de  $R_p \geq 3$  paquetes/segundo, carga de tráfico alta para cada uno de los protocolos simulados. A partir de estas gráficas se puede concluir que el máximo número de paquetes que puede cursar la red no está determinado por  $R_p$ .



(a)

(b)

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).

Como se puede observar en (a) para los protocolos S-MAC y T-MAC el comportamiento de las curvas es prácticamente el mismo, esto es debido a que la transmisión de paquetes se realiza de la misma forma, y aumenta debido a que se transmite en la ventana activa y los nodos envían los paquetes incesantemente hasta que entren en su periodo de inactividad y a medida que la carga de tráfico se vuelve alta pues la pendiente se hace más abrupta pues los nodos aprovechan dicho periodo de actividad. En cambio en (b) las curvas son distintas debido a que el protocolo S-MAC como tiene periodos cortos de inactividad está más receptivo que los otros protocolos, S-MAC tiene un mal manejo de su ciclo útil de radio y esto tiene un efecto negativo sobre las WSN que se explica a continuación.

El aumento de la carga de tráfico provoca un incremento de la contención por el medio y de los niveles de interferencia interna de la red. La figura 3.2 se muestra el *goodput* a nivel de radio de la red, compuesta por 20 nodos, notándose una ligera disminución con el aumento de  $R_p$  o sea que se experimenta una ligera disminución de la cantidad de paquetes recibidos exitosamente sin interferencia y por tanto 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 todos los escenarios se debe a interferencia interna pues no hay fuentes de interferencia externa presentes en ellos. En este sentido podemos destacar que el protocolo IEEE 802.15.4 tiene un *goodput* eficiente debido a que a pesar de que exista interferencia interna en la red sigue transmitiendo y recibiendo paquetes, mientras que en los demás protocolos cuando los nodos potencialmente receptores en la red saben que existe un envío hacia otro nodo sensor estos esperan y evitan la interferencia interna, esto repercute en la latencia de forma significativa porque en S-MAC y T-MAC la recepción de datos, sigue un protocolo RTS/CTS/DATA/ACK evitando el problema del nodo oculto.

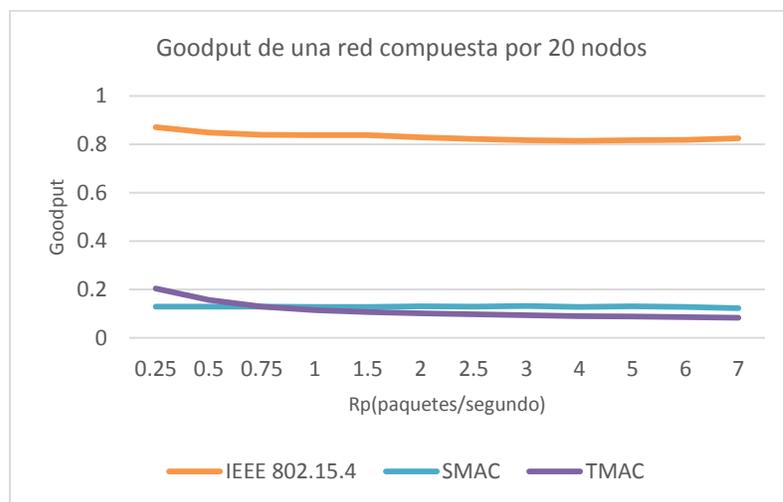


Figura 3.2: Escenario 1: *Goodput* de la red

El valor  $R_p = 3$  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 3.3 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  $R_p \leq 3$  paquetes/segundo, e incrementa significativamente a partir de ese valor.

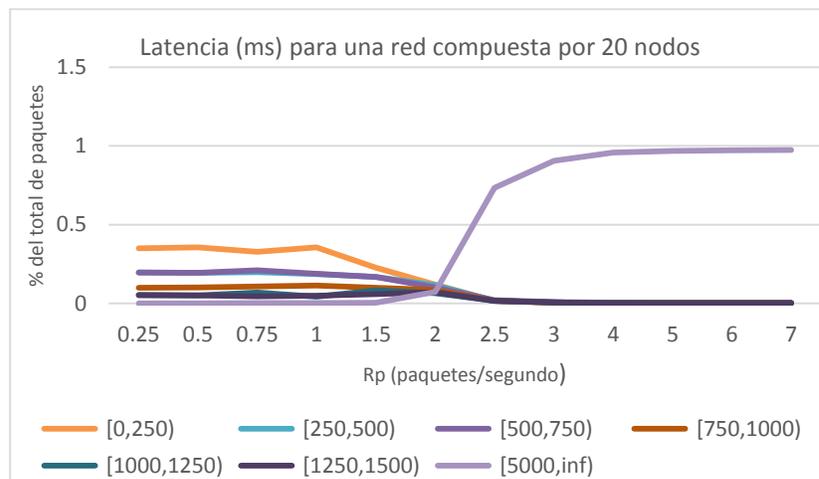


Figura 3.3: Escenario 1: Latencia en la red para el protocolo IEEE 802.15.4

No se incluyen las gráficas de latencia para los protocolos T-MAC y S-MAC pues cuando un nodo escucha un RTS o CTS de su vecino, se despierta brevemente al final de la transmisión. Si el nodo es el siguiente salto de la ruta de datos, despertando al final de la transmisión reducirá la latencia, entonces el paquete puede ser enviado de inmediato sin tener que esperar hasta el próximo período programado en el cual está despierto. En T-MAC ocurre igual, con la diferencia del FRTS que si existe un pequeño intervalo en el cual los nodos esperan por una respuesta futura pero nunca esta latencia es mayor que 1 segundos.

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, el consumo de energía cuando están recibiendo es mayor que cuando están transmitiendo.

Por esta razón, es importante destacar en este escenario de simulación que el consumo de energía en los nodos es variable según el protocolo ante la variación de la carga de tráfico, para una red compuesta por 20 nodos, tal y como se muestra en la figura 3.4.

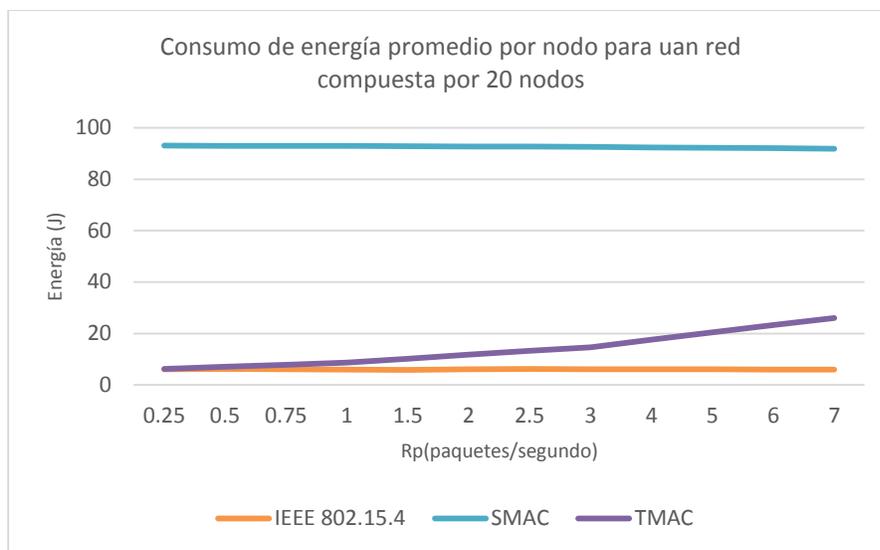


Figura 3.4: Escenario 1: Consumo de energía promedio de cada nodo.

Por ejemplo la principal deficiencia del protocolo S-MAC es su alto consumo energético como mencionamos antes por el mal manejo del ciclo útil de radio, sin embargo se mantiene invariable con el aumento de  $R_p$  debido a que se encuentra en la ventana activa transmitiendo y recibiendo cada momento, consumiendo la misma energía en estado recepción que en transmisión. En T-MAC ocurre un ligero incremento en el consumo de energía pues en este protocolo la transmisión de todos los mensajes es en ráfagas de longitud variable, yendo a dormir entre ráfagas para reducir aún más la escucha inactiva y con esto el consumo energético pero al aumentar  $R_p$  evidentemente las ráfagas cada vez tienen mayor longitud y por tanto consumen más energía. Para el protocolo IEEE 802.15.4 la carga de tráfico no influye en el consumo energético debido a las características en la recepción y transmisión de este protocolo.

### 3.1.1 Conclusiones parciales del epígrafe

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.

Para el protocolo S-MAC se destaca los altos valores de consumo de energía que no tiene relación alguna con el aumento de la carga de tráfico simplemente con las características propias del mismo, T-MAC si se ve influenciado por las variaciones de  $R_p$  por las ráfagas de longitud variable.

El goodput de la red se observa significativamente eficiente en IEEE 802.15.4 por sus características ya que los paquetes se envían y se reciben con interferencia o sin ella.

### 3.2 Escenario 2: Densidad de nodos

La densidad de nodos de la red es el objetivo fundamental de la simulación de este escenario. La figura 3.5 (a) muestra la cantidad promedio de paquetes transmitidos a nivel radio y la 3.5 (b) los paquetes recibidos a nivel de aplicación. Al comparar las gráficas no se encuentran en correspondencia el aumento lineal para la cantidad de paquetes recibidos a nivel de aplicación con los paquetes transmitidos a nivel radio. Para los paquetes que se transmiten a nivel radio se observa que al aumentar el ( $D_N$ ) ocurre un incremento lineal de los mismos, pero por el contrario a nivel de aplicación ocurre un aumento significativo en los paquetes recibidos para valores bajos de ( $D_N$ ) hasta que para valores mayores que 0,078 empiezan a disminuir incluso para valores que inducen baja carga de tráfico. Notar que para los paquetes recibidos a nivel de aplicación para los protocolos S-MAC y T-MAC ocurre cierta disminución a partir de una densidad de nodos de 0,078 nodos/m<sup>2</sup> que se debe fundamentalmente a que estos protocolos dependen de la contención por el medio durante la ventana activa que provoca colisiones y por tanto los paquetes no se reciben correctamente. Demostración de ello son los resultados de goodput a nivel de radio.

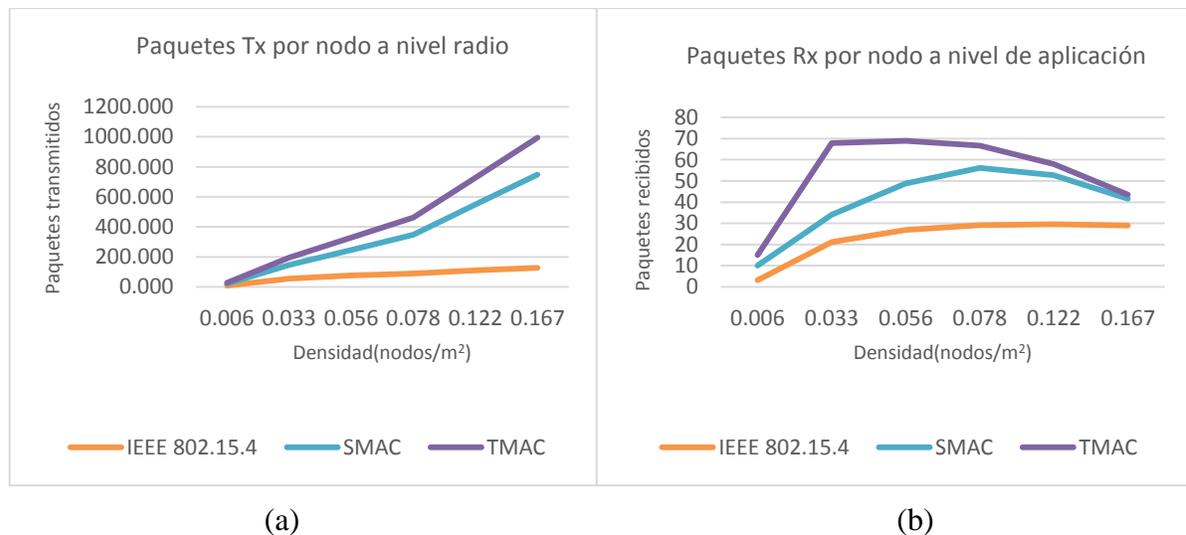


Figura 3.5: Escenario 2: Paquetes transmitidos a nivel radio (a) y Paquetes recibidos a nivel de aplicación.

El aumento de  $D_N$  causa este comportamiento en la red debido al aumento de la contención por el canal y las colisiones, logrando así un incremento en la interferencia interna de los nodos. Lo anterior es corroborado por el porcentaje de transmisiones que fallan debido a interferencia, lo que provoca la disminución de paquetes recibidos. En la figura 3.6 se ilustra el proceso anterior, mostrando el goodput de la red, en la cual se observa como existe una curva decreciente a medida que aumenta el  $D_N$ , esto se ve evidenciado con el aumento del porcentaje de transmisiones fallidas por causa de interferencia y la disminución del porcentajes de recepción de paquetes sin interferencia.

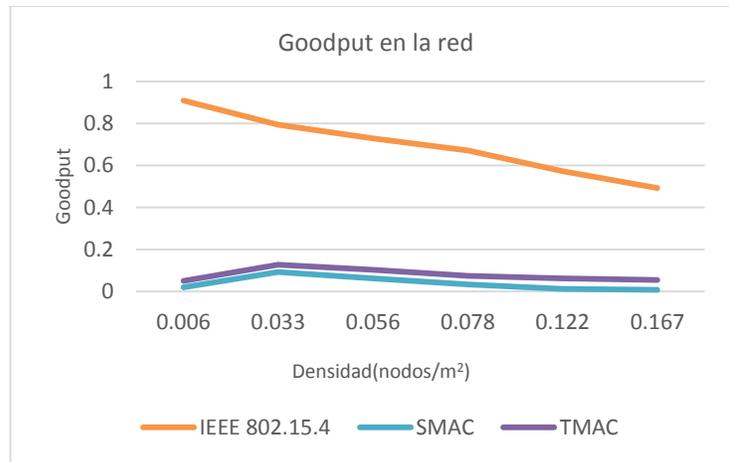


Figura 3.6: Escenario 2: Goodput de la red.

El aumento del  $D_N$  repercute negativamente sobre las capas de radio, esto influye también sobre la latencia en los paquetes. En la figura 3.7 se muestra el comportamiento de la latencia ante la variación de la densidad de nodos. En esta se muestra la latencia para un valor de  $R_p=1$  paquete/segundo tiene un comportamiento que 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 3.7, 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  $D_N$  cuando se aumenta  $R_p$ .

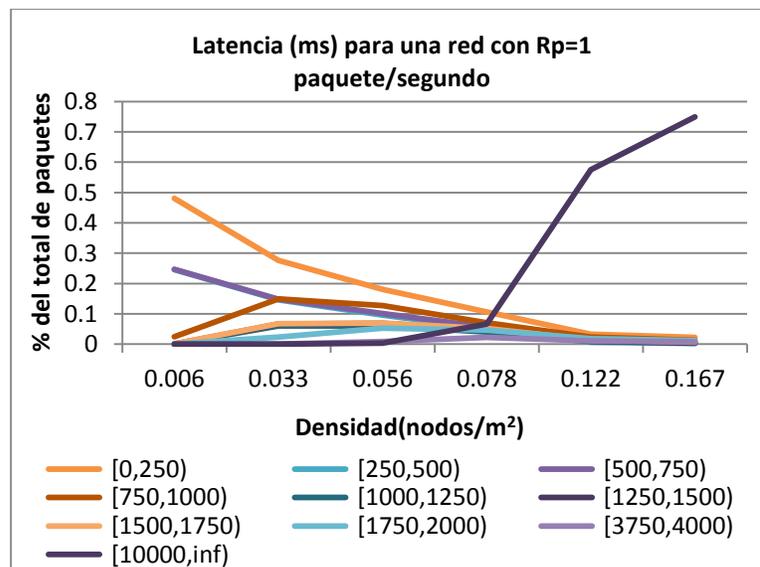


Figura 3.7: Escenario 2: Latencia promedio de los paquetes del protocolo IEEE 802.15.4.

En la figura 3.8 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 DN.

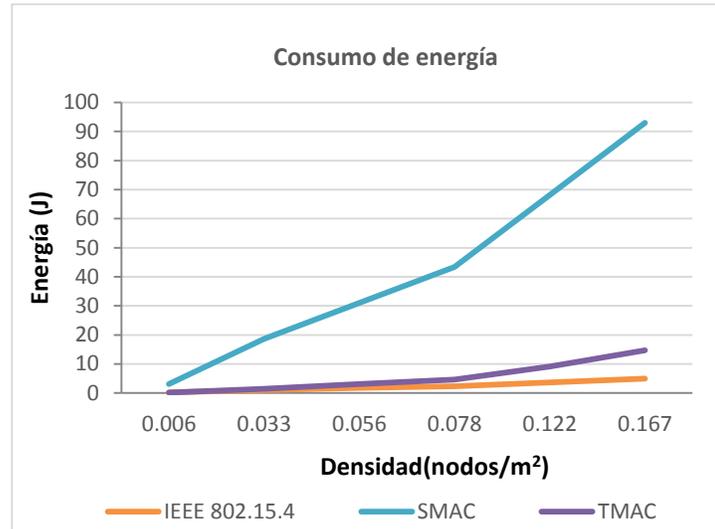


Figura 3.8: Escenario 2: Consumo de energía.

### 3.2.1 Conclusiones parciales del epígrafe

Los resultados de la simulación de este escenario demuestran que el aumento de DN 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, este último 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. Para los protocolos S-MAC y T-MAC se evidencia un efecto severo con respecto al consumo energético y al *goodput* de la red debido a los paquetes que son recibidos de todos los que se transmiten.

### 3.3 Conclusiones finales del capítulo

Los resultados obtenidos de la simulación de todos los escenarios demuestran que el protocolo MAC IEEE 802.15.4 es sensible a todas las variaciones a las que se sometió en cada uno de estos. Mientras que los protocolos S-MAC y T-MAC demuestran altos consumos de energía por el mal manejo del RDC.

De forma general el protocolo IEEE 802.15.4 presenta dos afectaciones fundamentales: una ante las variaciones de la carga de tráfico para valores superiores al punto de saturación y otra con el aumento de la densidad de nodos. Con respecto al consumo energético este protocolo se muestra eficiente pues a pesar de las variaciones realizadas el consumo nunca

es mayor que 20 J. La latencia experimenta muchos cambios en dependencia del escenario simulado pero de manera general nunca supera los 10 segundos.

Para el protocolo S-MAC se destaca los altos valores de consumo de energía que no tiene relación alguna con el aumento de la carga de tráfico simplemente con las características propias del mismo, T-MAC si se ve influenciado por las variaciones de  $R_p$  debido a las ráfagas de longitud variable. Con respecto a la latencia los protocolos S-MAC y T-MAC no se ven influenciados pues cuando un nodo escucha un RTS o CTS de su vecino, se despierta brevemente al final de la transmisión. Si el nodo es el siguiente salto de la ruta de datos, despertando al final de la transmisión reducirá la latencia, entonces el paquete puede ser enviado de inmediato sin tener que esperar hasta el próximo período programado en el cual está despierto. En T-MAC ocurre igual, con la diferencia del FRTS que si existe un pequeño intervalo en el cual los nodos esperan por una respuesta futura pero nunca esta latencia es mayor que 1 segundos.

---

## 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, 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 protocolo S-MAC presenta las siguientes desventajas: alta latencia, insensibilidad para variar cargas de tráfico, dado que su RDC y los paquetes de datos de difusión no usan RTS/CTS lo cual incrementa la probabilidad de colisión.
- El protocolo T-MAC dispone de mecanismos para evitar la sobre-escucha. Sin embargo su efecto colateral, aumentan las colisiones, haciendo que el *throughput* máximo decrezca. Por lo tanto, aunque evitando la sobre-escucha se ahorra en potencia, este mecanismo no debe ser usado cuando se requiera *throughput* máximo.
- 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 y densidad de la red. 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.
- Con las simulaciones se considera que el protocolo IEEE 802.15.4 presenta dos afectaciones fundamentales: una ante las variaciones de la carga de tráfico para valores superiores al punto de saturación y otra con el aumento de la densidad de nodos. Con respecto al consumo energético este protocolo se muestra eficiente pues a pesar de las variaciones realizadas el consumo nunca es mayor que 20 J.

- Para el protocolo S-MAC se destaca los altos valores de consumo de energía que no tiene relación alguna con el aumento de la carga de tráfico simplemente con las características propias del mismo, T-MAC si se ve influenciado por las variaciones de  $R_p$  debido a las ráfagas de longitud variable.

## 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 multitud de 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 aún no se encuentran disponibles en dicho simulador.
5. Implementar en Castalia módulos para diversos protocolos MAC.

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey,” *Comput. Netw.*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.
- [2] L. M. S. Committee and others, “Wireless medium access control (MAC) and physical Layer (PHY) specifications for wireless personal area networks (WPANs),” *IEEE Comput. Soc.*, 2002.
- [3] P. Huang, L. Xiao, S. Soltani, M. W. Mutka, and N. Xi, “The evolution of MAC protocols in wireless sensor networks: A survey,” *Commun. Surv. Tutor. IEEE*, vol. 15, no. 1, pp. 101–120, 2013.
- [4] K. Langendoen, “Medium access control in wireless sensor networks,” *Medium Access Control Wirel. Netw.*, vol. 2, pp. 535–560, 2008.
- [5] J. A. Gutierrez, E. H. Callaway, and R. L. Barrett, *Low-rate wireless personal area networks: enabling wireless sensors with IEEE 802.15. 4*. IEEE Standards Association, 2004.
- [6] Z. Sheng, S. Yang, Y. Yu, A. Vasilakos, J. Mccann, and K. Leung, “A survey on the ietf protocol suite for the internet of things: Standards, challenges, and opportunities,” *Wirel. Commun. IEEE*, vol. 20, no. 6, pp. 91–98, 2013.
- [7] A. Koubaa, M. Alves, and E. Tovar, “A comprehensive simulation study of ranurated CSMA/CA for IEEE 802.15. 4 wireless sensor networks,” in *5th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*, 2006, pp. 183–192.
- [8] Y.-X. Li, H.-S. Shi, and S.-P. Zhang, “An Energy-Efficient MAC protocol for wireless sensor network,” in *Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE), 2010 3rd International Conference on*, 2010, vol. 4, pp. V4–619.
- [9] IEEE Std., “Local and metropolitan area networks - Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) IEEE Computer Society,” 2011.
- [10] I. Howitt and J. A. Gutierrez, “IEEE 802.15. 4 low rate-wireless personal area network coexistence issues,” in *Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003. 2003 IEEE*, 2003, vol. 3, pp. 1481–1486.

- [11] K. Pahlavan and P. Krishnamurthy, "IEEE 802.15 Wireless Personal-Area Network," *Netw. Fundam. Wide Local Pers. Area Commun.*, pp. 443–448.
- [12] 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*, 2006, pp. 48–57.
- [13] 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 *Performance, Computing, and Communications, 2004 IEEE International Conference on*, 2004, pp. 701–706.
- [14] U. Colesanti and S. Santini, *A performance evaluation of the collection tree protocol based on its implementation for the castalia wireless sensor networks simulator*. ETH, Department of Computer Science, 2010.
- [15] A. De Domenico, E. C. Strinati, and M. Di Benedetto, "A survey on MAC strategies for cognitive radio networks," *Commun. Surv. Tutor. IEEE*, vol. 14, no. 1, pp. 21–44, 2012.
- [16] 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*, 2004, p. 224.
- [17] A. Boulis, "Castalia User Manual," 2009.
- [18] A. Boulis, "Castalia: a simulator for wireless sensor networks and body area networks—User's Manual," *Aust. Inf. Commun. Technol. Res. Cent. NICTA*, 2011.
- [19] J. M. Gilbert and F. Balouchi, "Comparison of energy harvesting systems for wireless sensor networks," *Int. J. Autom. Comput.*, vol. 5, no. 4, pp. 334–347, 2008.
- [20] X. Xian, W. Shi, and H. Huang, "Comparison of OMNET++ and other simulator for WSN simulation," in *Industrial Electronics and Applications, 2008. ICIEA 2008. 3rd IEEE Conference on*, 2008, pp. 1439–1443.
- [21] 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*, 2008, pp. 53–62.
- [22] V. Rajendran, K. Obraczka, and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks," *Wirel. Netw.*, vol. 12, no. 1, pp. 63–78, 2006.
- [23] Y. Tselishchev, A. Boulis, and L. Libman, "Experiences and lessons from implementing a wireless sensor network mac protocol in the castalia simulator," in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2010 IEEE*, 2010, pp. 1–6.

- [24] M. Umlauf and P. Reichl, “Experiences with the ns-2 network simulator-explicitly setting seeds considered harmful,” in *Wireless Telecommunications Symposium, 2007. WTS 2007*, 2007, pp. 1–5.
- [25] W. Dargie and C. Poellabauer, *Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice*. John Wiley & Sons, 2010.
- [26] T. R. Henderson, M. Lacey, G. F. Riley, C. Dowell, and J. B. Kopena, “Network simulations with the ns-3 simulator,” *SIGCOMM Demonstr.*, vol. 15, p. 17, 2008.
- [27] G. Pongor, “Omnet: Objective modular network testbed,” in *Proceedings of the International Workshop on Modeling, Analysis, and Simulation On Computer and Telecommunication Systems*, 1993, pp. 323–326.
- [28] G. F. Lucio, M. Paredes-Farrera, E. Jammeh, M. Fleury, and M. J. Reed, “Opnet modeler and ns-2: Comparing the accuracy of network simulators for packet-level analysis using a network testbed,” *WSEAS Trans. Comput.*, vol. 2, no. 3, pp. 700–707, 2003.
- [29] S. Du, A. K. Saha, and D. B. Johnson, “RMAC: A routing-enhanced duty-cycle MAC protocol for wireless sensor networks,” in *INFOCOM 2007. 26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE*, 2007, pp. 1478–1486.
- [30] M. A. C. Pérez, J. C. C. Quiñones, J. C. Madelayne Morales Rodríguez Cuéllar Quiñones, and J. D. T. Vanegas, *Simulando con OMNET selección de la herramienta y su utilización*. Universidad ICESI, 2013.
- [31] Y.-R. Sun, S. Kumar, and A. Jantsch, “Simulation and evaluation for a network on chip architecture using ns-2,” in *Proceedings of the IEEE NorChip conference*, 2002, pp. 167–172.
- [32] S. Wang, K. Z. Liu, and F. P. Hu, “Simulation of wireless sensor networks localization with omnet,” in *Mobile Technology, Applications and Systems, 2005 2nd International Conference on*, 2005, pp. 1–6.
- [33] S. Gabriel, D. Mosse, and R. Cleric, “TDMA-ASAP: Sensor network TDMA scheduling with adaptive ranura-stealing and parallelism,” in *Distributed Computing Systems, 2009. ICDCS’09. 29th IEEE International Conference on*, 2009, pp. 458–465.
- [34] L. Faxun, “The Application of GNS3 in Network Experiments [J],” *Comput. Telecommun.*, vol. 10, p. 032, 2010.
- [35] R. Van Kranenburg, E. Anzelmo, A. Bassi, D. Caprio, S. Dodson, and M. Ratto, “The Internet of things,” *Crit. Ambient Technol. -Seeing Netw. RFID Netw. Noteb.*, vol. 2, 2011.
- [36] H. Zhou, *The internet of things in the cloud: A middleware perspective*. CRC Press, 2012.
- [37] A. Varga and others, “The OMNeT++ discrete event simulation system,” in *Proceedings of the European simulation multiconference (ESM’2001)*, 2001, vol. 9, p. 65.
- [38] A. BIBLIOGRÁFICA, “USO DE SOFTWARE DE ADMINISTRACIÓN BIBLIOGRÁFICA: ZOTERO Curso de Actualización Profesional.”

- [39] E. Fleisch, "What is the internet of things? An economic perspective," *Econ. Manag. Financ. Mark.*, no. 2, pp. 125–157, 2010.
- [40] M. Buettner, G. V. Yee, E. Anderson, and R. Han, "X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks," in *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, 2006, pp. 307–320.
- [41] 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*, 2008, pp. 53–63.
- [42] J. Alonso-Arévalo, "Zotero: gestor de referencias de software libre," 2009.
- [43] C. M. García Algora, "Análisis del desempeño del protocolo MAC del estándar IEEE 802.15.4," Universidad Central "Martha Abreu" de las Villas, Santa Clara, Villa Clara, 2014.
- [44] L. S. Committee and others, "Part 15.4: wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs)," *IEEE Comput. Soc.*, 2003.
- [45] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in *INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, 2002, vol. 3, pp. 1567–1576.
- [46] 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*, 2003, pp. 171–180.
- [47] NS, Network Simulator. Disponible: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, 2010.
- [48] X. Chang, "Network simulations with OPNET," in *Proceedings of the 31st conference on Winter simulation: Simulation---a bridge to the future-Volume 1*, 1999, pp. 307–314.

---

# ANEXO A

## ARCHIVOS DE CONFIGURACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

### A-1. Escenario 1 IEEE802.15.4: Carga de tráfico

```
[General]
include ../Parameters/Castalia.ini

sim-time-limit = 1501s

SN.numNodes = 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 = 20000
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 = 2

#Explicar selección de este valor: por debajo de 1000 fallan
muchos paquetes por buffer overflow
SN.node[*].Communication.MAC.macBufferSize = 1000
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 IEEE.802.15.4: Densidad de nodos

```
[General]
include ../Parameters/Castalia.ini

sim-time-limit = 1501s

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 = 20000
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 = 2

#Explicar selección de este valor: por debajo de 1000 fallan
muchos paquetes por buffer overflow
SN.node[*].Communication.MAC.macBufferSize = 1000
SN.node[*].Communication.MAC.macMaxPacketSize = 200
SN.node[*].Application.packet_rate = ${rate=0.5,1.25,2}
```

### A-3. Escenario SMACE1: Carga de tráfico

```
[General]
include ../Parameters/Castalia.ini

sim-time-limit = 1501s

SN.numNodes = 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 = "-15dBm"
SN.node[*].ResourceManager.baselineNodePower = 0
SN.node[*].Communication.Radio.collisionModel = 1

SN.node[*].ApplicationName = "ThroughputTest"
SN.node[*].Application.startupDelay = 1
SN.node[0].Application.isSink = true
SN.node[*].Application.constantDataPayload = 2000
SN.node[0].Application.latencyHistogramMax = 20000
SN.node[0].Application.latencyHistogramBuckets = 40
SN.node[*].Application.packet_rate =
${rate=0.25,0.5,0.75,1,1.5,2,2.5,3,4,5,6,7}

SN.node[*].Communication.MACProtocolName = "TMAC"
SN.node[*].Communication.MAC.listenTimeout = 61
SN.node[*].Communication.MAC.disableTAextension = true
SN.node[*].Communication.MAC.conservativeTA = false
SN.node[*].Communication.MAC.phyDataRate = 250
SN.node[*].Communication.MAC.phyFrameOverhead = 6

#Explicar selección de este valor: por debajo de 1000 fallan
muchos paquetes por buffer overflown
SN.node[*].Communication.MAC.macBufferSize = 1000
SN.node[*].Communication.MAC.macMaxPacketSize = 200
```

#### A-4 Escenario SMACE2: Densidad de nodo

```
[General]
include ../Parameters/Castalia.ini

sim-time-limit = 1501s

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[*].Communication.Radio.collisionModel = 1
SN.node[*].ResourceManager.baselineNodePower = 0

SN.node[*].ApplicationName = "ThroughputTest"
SN.node[0].Application.isSink = true
SN.node[*].Application.constantDataPayload = 2000
SN.node[*].Application.startupDelay = 1
SN.node[0].Application.latencyHistogramMax = 20000
SN.node[0].Application.latencyHistogramBuckets = 40
SN.node[*].Application.packet_rate = ${rate=0.5,1.25,2}

SN.node[*].Communication.MACProtocolName = "TMAC"
SN.node[*].Communication.MAC.listenTimeout = 61
SN.node[*].Communication.MAC.disableTAextension = true
SN.node[*].Communication.MAC.conservativeTA = false
SN.node[*].Communication.MAC.phyFrameOverhead = 6
SN.node[*].Communication.MAC.phyDataRate = 250

#Explicar selección de este valor: por debajo de 1000 fallan
muchos paquetes por buffer overflow
SN.node[*].Communication.MAC.macBufferSize = 1000
SN.node[*].Communication.MAC.macMaxPacketSize = 200
```

### A-5. Escenario de simulación TMACE1: Carga de tráfico

```
[General]
include ../Parameters/Castalia.ini

sim-time-limit = 1501s

SN.numNodes = 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 = "-15dBm"
SN.node[*].Communication.Radio.collisionModel = 1
SN.node[*].ResourceManager.baselineNodePower = 0

SN.node[*].ApplicationName = "ThroughputTest"
SN.node[0].Application.isSink = true
SN.node[*].Application.constantDataPayload = 2000
SN.node[*].Application.startupDelay = 1
SN.node[0].Application.latencyHistogramMax = 20000
SN.node[0].Application.latencyHistogramBuckets = 40
SN.node[*].Application.packet_rate =
${rate=0.25,0.5,0.75,1,1.5,2,2.5,3,4,5,6,7}

SN.node[*].Communication.MACProtocolName = "TMAC"
SN.node[*].Communication.MAC.useRtsCts = true
SN.node[*].Communication.MAC.phyDataRate = 250
SN.node[*].Communication.MAC.phyFrameOverhead = 6

#Explicar selección de este valor: por debajo de 1000 fallan
muchos paquetes por buffer overflown
SN.node[*].Communication.MAC.macBufferSize = 1000
SN.node[*].Communication.MAC.macMaxPacketSize = 200
```

## A-6. Escenario de simulación TMACE2: Densidad de nodo

```
[General]
include ../Parameters/Castalia.ini

sim-time-limit = 1501s

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[*].Communication.Radio.collisionModel = 1
SN.node[*].ResourceManager.baselineNodePower = 0

SN.node[*].ApplicationName = "ThroughputTest"
SN.node[0].Application.isSink = true
SN.node[*].Application.constantDataPayload = 2000
SN.node[*].Application.startupDelay = 1
SN.node[0].Application.latencyHistogramMax = 20000
SN.node[0].Application.latencyHistogramBuckets = 40
SN.node[*].Application.packet_rate = ${rate=0.5,1.25,2}

SN.node[*].Communication.MACProtocolName = "TMAC"
SN.node[*].Communication.MAC.useRtsCts = true
SN.node[*].Communication.MAC.phyDataRate = 250
SN.node[*].Communication.MAC.phyFrameOverhead = 6

#Explicar selección de este valor: por debajo de 1000 fallan
muchos paquetes por buffer overflow
SN.node[*].Communication.MAC.macBufferSize = 1000
SN.node[*].Communication.MAC.macMaxPacketSize = 200
```