Anexo I

Don AGUSTÍN TRUJILLO PINO, SECRETARIO DEL DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA Y SISTEMAS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA,

CERTIFICA,

Que el Consejo del Departamento, en su sesión extraordinaria de fecha 26 de Octubre de 2015, tomó el acuerdo de dar el consentimiento para su tramitación a la tesis doctoral titulada "***Análisis De Los Efectos Del Problema Del Nodo Oculto En Las Redes IEEE 802.15.7. Propuesta de Solución***", presentada por el doctorando Don Carlos Ley Bosch y dirigida por la Dra. Dª. Itziar Alonso González.

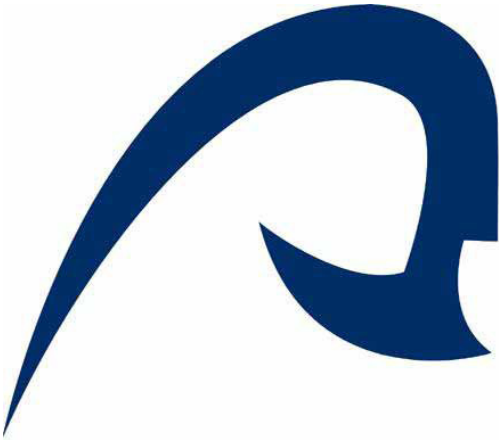
Y para que así conste, y a efectos de lo previsto en el Artº 73.2 del Reglamento de Estudios de Doctorado de esta Universidad, firmo la presente en Las Palmas de Gran Canaria, a Veintiséis de Octubre de Dos Mil Quince.

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

Programa de Doctorado:

Tecnologías de la Información y sus Aplicaciones.

Departamento de Informática y Sistemas.



Tesis Doctoral:

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DEL PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN LAS REDES IEEE 802.15.7. PROPUESTA DE SOLUCIÓN.

Autor: Carlos Ley Bosch.

Directora: Itziar Alonso González.

La Directora, El Autor,

Las Palmas de Gran Canaria, a 19 de Octubre de 2015

Agradecimientos

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido a que pueda realizar el trabajo presentado en esta tesis.

A Itziar, mi directora de tesis, cuyo trabajo y dedicación han sido fundamentales para la realización de este trabajo.

A Rafael Pérez y los compañeros del IDeTIC, por su colaboración y tiempo dedicado.

A todos los amigos y compañeros de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria que, de una u otra forma, me han prestado su apoyo a lo largo de estos años.

A Cristina, por estar a mi lado siempre que me ha hecho falta.

A todos, GRACIAS.

Resumen

En los últimos años, el uso cada vez más generalizado de los diodos LED (*Light Emitting Diode*) en los sistemas de iluminación ha dado lugar a la aparición de las tecnologías conocidas como VLC (*Visible Light Communications*), mediante las que se realizan comunicaciones de datos haciendo uso de la banda visible del espectro electromagnético. En el año 2011, el IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) publicó el estándar IEEE 802.15.7 para redes inalámbricas WPAN (*Wireless Personal Area Networks*) en las que se emplean tecnologías VLC.

Debido a la limitación en el alcance de la señal transmitida, en las redes inalámbricas ocurre el llamado problema del nodo oculto, producido cuando hay nodos en la red cuyas transmisiones no son detectadas por otros nodos. Este problema puede ocasionar una degradación importante en las comunicaciones, cuando éstas se realizan mediante el método de control de acceso al medio CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), el cual es utilizado en el estándar IEEE 802.15.7.

En esta tesis se evalúan y analizan los efectos del problema del nodo oculto en el funcionamiento de las redes basadas en el estándar IEEE 802.15.7. Para realizar este análisis se ha desarrollado un modelo de simulación con el que evaluar distintos parámetros de rendimiento de la red, sometiendo a la misma a distintas condiciones de funcionamiento.

Como parte del trabajo de investigación de esta tesis, se realiza una propuesta de solución al problema del nodo oculto, elegida en base a criterios de eficacia, viabilidad, y facilidad de implementación. La validez de la solución propuesta queda enteramente demostrada a partir de los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas.

Abstract

In the last years, the increasingly use of LEDs (*Light Emitting Diodes*) in illumination systems has conducted to the emergence of the VLC (*Visible Light Communication*) technologies, in which data communication is performed by transmitting through the visible band of the electromagnetic spectrum. In the year 2011, the IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) published the standard IEEE 802.15.7 for Wireless Personal Area Networks (WPAN) based on VLC technologies.

Due to limitations in the coverage of the transmitted signal, wireless networks can suffer from the hidden node problem, produced when there are nodes in the network whose transmissions are not detected by other nodes. This problem can cause an important degradation in the communications, when these are made by means of the CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) access control method, which is also used in the standard IEEE 802.15.7.

The research work in this thesis deals with the analysis and evaluation of the effects of the hidden node problem, in the performance of networks based in the standard IEEE 802.15.7. To accomplish this work, a simulation model has been developed to evaluate several network performance metrics, obtained from different operating conditions.

As part of this thesis research work, a solution to the hidden node problem is proposed, in accordance to efficiency, viability and ease of implementation criteria. The validity of the proposed solution is fully demonstrated with the obtained simulation results.

Índice de contenidos

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1 ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN 1
1.2 OBJETIVOS Y APORTACIONES DE LA PRESENTE TESIS DOCTORAL 3
1.3 DESCRIPCIÓN DEL DOCUMENTO 4

2. FUNDAMENTOS Y ESTADO DEL ARTE 5

2.1 COMUNICACIONES ÓPTICAS NO GUIADAS MEDIANTE LUZ VISIBLE 5
2.1.1 Ventajas de las tecnologías VLC 6
2.1.2 Aplicaciones de las tecnologías VLC 7
2.1.3 Principales retos sobre las tecnologías VLC 10
2.1.4 Organismos de normalización y estándares 12
2.2 CONFIGURACIONES DE LOS ENLACES ÓPTICOS EN VLC 14
2.3 CARACTERIZACIÓN DEL CANAL ÓPTICO 16
2.3.1 Caracterización del transmisor óptico 18
2.3.2 Caracterización del receptor óptico 19
2.3.3 Ganancia del canal en configuración LOS 20
2.3.4 Relación señal a ruido 22
2.4 EL PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN LAS REDES VLC 24

3. EL ESTÁNDAR IEEE 802.15.7 29

3.1 INTRODUCCIÓN 29
3.2 TIPOS DE DISPOSITIVOS 30
3.3 TOPOLOGÍAS DE RED 31
3.4 ARQUITECTURA DE UN DISPOSITIVO 32

3.5 LA CAPA PHY 34
3.5.1 Modos de operación PHY 34
3.5.2 Formato de la trama PHY 37
3.5.3 Evaluación de la disponibilidad del canal 39
3.5.4 Control de luminosidad y patrones de inactividad 40
3.5.5 Constantes y atributos de la capa PHY 42
3.6 LA CAPA MAC 43
3.6.1 Estructura de la supertrama 44
3.6.2 Acceso aleatorio al canal 46
3.6.3 Formato general y tipos de tramas MAC 49
3.6.4 Constantes y atributos de la capa MAC 51

4. MODELO DE SIMULACIÓN 53

4.1 PLATAFORMA DE SIMULACIÓN OMNET++ 53
4.2 DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DEL MODELO DE SIMULACIÓN 54
4.2.1 La red 54
4.2.2 El medio óptico 55
4.2.3 El nodo 55
4.2.4 Estructura jerárquica de módulos 58
4.3 TRABAJOS PREVIOS DE EVALUACIÓN DE PRESTACIONES DEL ESTÁNDAR IEEE 802.15.7 59
4.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN 61
4.4.1 Modelo de canal óptico 62
4.4.2 Procedimiento de acceso al medio de transmisión 63
4.4.3 Caracterización del tráfico de la capa de aplicación 65

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES 67

5.1 PRESTACIONES DE LAS COMUNICACIONES UPLINK SIN NODOS OCULTOS 67
5.1.1 Modelo de canal utilizado 68
5.1.2 Parámetros de simulación de la capa PHY 69
5.1.3 Parámetros de simulación de la capa MAC 70
5.1.4 Parámetros de simulación de la capa de aplicación y la cola Ifq 72
5.1.5 Condiciones de simulación con tráfico saturado 72
5.1.6 Resultados de simulación con tráfico saturado 74
5.1.7 Condiciones de simulación con tráfico no saturado 75
5.1.8 Resultados de simulación con tráfico no saturado 76

5.2 PRESTACIONES DE LAS COMUNICACIONES UPLINK CON NODOS OCULTOS 87
5.2.1 Parámetros y condiciones de simulación 88
5.2.2 Resultados de simulación con tráfico no saturado 89

6. PROPUESTA DE SOLUCIÓN AL PROBLEMA DEL NODO OCULTO 99

6.1 ANTECEDENTES 99
6.2 PROPUESTA DE SOLUCIÓN 102
6.2.1 Descripción del modelo 102
6.2.2 Condiciones y resultados de simulación 105

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS 111

7.1 CONCLUSIONES 111
7.2 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN 113
7.3 PUBLICACIONES DERIVADAS DE ESTA TESIS DOCTORAL 114

BIBLIOGRAFÍA 115

Índice de figuras

Figura 2.1 - Sistema de iluminación doméstico integrado con VLC 8

Figura 2.2 - Ejemplo de prevención de accidentes mediante ITS 9

Figura 2.3 - Configuraciones de enlace óptico en VLC: LOS directivo, LOS no directivo y difuso 16

Figura 2.4 - Modelo de canal VLC con IM/DD 16

Figura 2.5 - Modelo de canal óptico como sistema lineal en banda base 17

Figura 2.6 - Ejemplos de diagramas de radiación lambertianos..... 19

Figura 2.7 - Transmisor y receptor en configuración de enlace LOS..... 21

Figura 2.8 - Ejemplo de escenario con nodos ocultos en redes inalámbricas basadas en radio frecuencia 25

Figura 2.9 – Ejemplo de escenario con nodos ocultos en redes VLC 26

Figura 3.1 - Topologías de red en el estándar IEEE 802.15.7..... 31

Figura 3.2 - Arquitectura de un dispositivo IEEE 802.15.7 32

Figura 3.3 - Formato general de la PPDU 37

Figura 3.4 - Ejemplo de uso de patrones de inactividad insertados entre tramas..... 41

Figura 3.5 - Espectro en el dominio de modulación de la señal en VLC 42

Figura 3.6 - Ejemplo de estructura de supertrama..... 46

Figura 3.7 - Versión ranurada del algoritmo de acceso aleatorio. 47

Figura 3.8 - Formato general de las tramas MAC. 50

Figura 4.1 - Modelo de red con topología en estrella. 55

Figura 4.2 - Módulos componentes de cada nodo de la red. 56

Figura 4.3 - Jerarquía de módulos del modelo de simulación 59

Figura 4.4 - Escenario de red en estrella con cuatro dispositivos..... 62

Figura 4.5 - Algoritmo de acceso aleatorio implementado en el modelo de simulación. 64

Figura 5.1 - *Goodput* en función de la carga sobre la red, sin nodos ocultos..... 78

Figura 5.2 - Tasa de pérdida de paquetes, sin nodos ocultos 79

Figura 5.3 - Tiempos de transacciones CSMA/CA terminadas con éxito, sin nodos ocultos..... 83

Figura 5.4 - Tiempos de transacciones CSMA/CA terminadas con fallo, sin nodos ocultos..... 84

Figura 5.5 - Consumo medio de corriente por dispositivo, sin nodos ocultos 86

Figura 5.6 - Consumo total acumulado por todos los dispositivos, sin nodos ocultos... 87

Figura 5.7 - *Goodput* en función de la carga total sobre la red, con nodos ocultos 90

Figura 5.8 - Tasa de pérdida de paquetes, con nodos ocultos 91

Figura 5.9 - *Goodput* en ausencia y presencia de nodos ocultos. 92

Figura 5.10 - Tasa de pérdida de paquetes en ausencia y presencia de nodos ocultos... 92

Figura 5.11 - Tiempos de transacciones CSMA/CA terminadas con éxito, con nodos ocultos..... 94

Figura 5.12 - Tiempos de transacciones CSMA/CA terminadas con fallo, con nodos ocultos..... 96

Figura 5.13 - Consumo medio de corriente por dispositivo, con nodos ocultos 97

Figura 6.1 - Uso de patrones de inactividad fuera y dentro de banda como mecanismo de señalización en el coordinador. 104

Figura 6.2 - Resultados de *goodput* obtenidos con la solución propuesta..... 106

Figura 6.3 - Resultados de tasa de pérdida de paquetes obtenidos con la solución propuesta..... 107

Figura 6.4 - Valores de *goodput* obtenidos con la solución propuesta sin retardo añadido y con retardo añadido al cambiar el tipo de patrón de inactividad. 108

Índice de tablas

Tabla 3.1 - Tipos de dispositivos y sus características. 30
Tabla 3.2 - Configuraciones MCS-ID para el modo PHY II. 36
Tabla 3.3 - Constantes de la capa PHY. 43
Tabla 3.4 – Principales constantes de la capa MAC 51
Tabla 3.5 – Principales atributos de la capa MAC. 52

Tabla 5.1 - Parámetros de configuración de la capa PHY cuando no hay nodos ocultos . 69
Tabla 5.2 - Parámetros de configuración de la capa MAC 71
Tabla 5.3 - Valores de *throughput* con tráfico saturado. 74
Tabla 5.4 - Estadísticas obtenidas del CSMA/CA, sin nodos ocultos 81
Tabla 5.5 - Estados y consumos del transceptor óptico 85
Tabla 5.6 - Parámetros de configuración de la capa PHY cuando hay nodos ocultos 88
Tabla 5.7 - Estadísticas obtenidas del CSMA/CA, con nodos ocultos 93
Tabla 5.8 - Comparativa de consumos de corriente por byte de carga útil 98

Lista de acrónimos

ACK	*Acknowledgement*
BE	*Backoff Exponent*
BER	*Bit Error Rate*
BI	*Beacon Interval*
BO	*Beacon Order*
CAP	*Contention Access Period*
CCA	*Clear Channel Assessment*
CFP	*Contention Free Period*
CRC	*Cyclic Redundancy Checks*
CSK	*Color-Shift Keying*
CSMA/CA	*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*
CTS	*Clear to Send*
CVD	*Color Visibility and Dimming frame*
DD	*Direct Detection*
DME	*Device Management Entity*
FEC	*Forward Error Correction*
FET	*Field Effect Transistor*
FIFO	*First In First Out*
FLP	*Fast Locking Pattern*
FOV	*Field of View*

GPS	*Global Positioning System*
GTS	*Guaranteed Time Slot*
HCS	*Header Check Sequence*
ICSA	*Infrared Communication Systems Association*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronic Engineers*
Ifq	*Interface Queue*
IFS	*Interframe Space*
IM	*Intensity Modulation*
IrDA	*Infrared Data Association*
ISM	*Industrial Scientific and Medical*
ITS	*Intelligent Transportation Systems*
JEITA	*Japan Electronics and Information Technology Industries Association*
LAN	*Local Area Network*
LED	*Light Emitting Diode*
Li-Fi	*Light-Fidelity*
LLC	*Logical Link Control*
LOS	*Line of Sight*
MAC	*Medium Access Control*
MAC PIB	*MAC Layer Personal Area Network Information Base*
MACAW	*Multiple Access with Collision Avoidance for Wireless*
MCPS-SAP	*MAC Common Part Sublayer Service Access Point*
MCS-ID	*Modulation Coding Scheme Identifier*
MHR	*MAC Header*
MFR	*MAC Footer*
MIMO	*Multiple Input Multiple Output*
MLME-SAP	*MAC Sublayer Management Entity Service Access Point*
MPDU	*MAC Protocol Data Unit*
MSDU	*MAC Service Data Unit*
MTU	*Maximum Transmission Unit*
NB	*Number of Backoffs*
NED	*Network Description*
NLOS	*non-LOS*
OMEGA	*hOME Gigabit Access*
OMNeT++	*Objective Modular Network Testbed*

OOK	*On-Off Keying*
PD-SAP	*PHY Data Service Access Point*
PHR	*PHY Header*
PHY PIB	*PHY Layer Personal Area Network Information Base*
PLME	*Physical Layer Management Entity*
PLME-SAP	*PLME Service Access Point*
PPDU	*Physical Layer Data Unit*
PSDU	*PHY Service Data Unit*
RLL	*Run Length Limited*
RS	*Reed-Solomon*
RTS	*Request to Send*
RX	*Receiver*
SAP	*Service Access Point*
SD	*Superframe Duration*
SHR	*Synchronization Header*
SINR	*Signal to Interference plus Noise Ratio*
SO	*Superframe Order*
SSCS	*Service-Specific Convergence Sublayer*
TDM	*Time Division Multiplexing*
TDP	*Topology Dependent Pattern*
TTA	*Telecommunications Technology Association of Korea*
TX	*Transmitter*
VLC	*Visible Light Communications*
VLCA	*Visible Light Communications Association*
VLCC	*Visible Light Communication Consortium*
VPAN	*Visible-light Communication Personal Area Network*
WDM	*Wavelength Division Multiplexing*
WPAN	*Wireless Personal Area Networks*
WQI	*Wavelength Quality Indication*
VPPM	*Variable Pulse Position Modulation*

1. Introducción

En este capítulo se exponen los antecedentes que han motivado la realización de este trabajo de investigación, introduciéndose el problema del nodo oculto en el contexto de las comunicaciones ópticas y las redes basadas en el estándar IEEE 802.15.7. Se presentan los objetivos y aportaciones de esta tesis doctoral, y por último, se detalla la estructura de capítulos en que está organizado este documento.

1.1 Antecedentes y motivación

Hasta la actualidad, las comunicaciones inalámbricas se han basado mayoritariamente en sistemas de transmisión que utilizan señales de radio frecuencia. Estos sistemas presentan diversos inconvenientes, entre los que se pueden destacar la limitación en el ancho de banda, las estrictas regulaciones normativas, las restricciones de uso en entornos como hospitales o plantas químicas, la posibilidad de sufrir interceptaciones, y las interferencias que limitan los canales de comunicación utilizables en bandas de frecuencias próximas. Dichos inconvenientes, unidos a la progresiva saturación en el uso de la banda del espectro de radio frecuencia, vienen generando una creciente demanda de uso en tecnologías de comunicación alternativas para las comunicaciones inalámbricas de banda ancha.

Las comunicaciones ópticas no guiadas representan una alternativa a los sistemas basados en radio frecuencia, teniendo la ventaja de no contar con la mayoría de los inconvenientes asociados a los mismos. Dentro de estas tecnologías se encuentran las comunicaciones ópticas no guiadas basadas en luz visible [Jovicic13], denominadas

mediante las siglas VLC (*Visible Light Communications*), que utilizan la parte del espectro electromagnético que es detectable por el ojo humano. En VLC la información se transmite modulando la intensidad de una fuente óptica que emite luz visible, empleando tiempos de conmutación menores a la persistencia del ojo humano, para evitar que pueda percibirse el parpadeo de la fuente emisora.

En los últimos años, el desarrollo de las tecnologías VLC ha experimentado un fuerte impulso gracias al uso cada vez más extensivo de los diodos LED (*Light Emitting Diode*) en los sistemas de iluminación destinados a entornos interiores y exteriores [Zhou07]. En el año 2011, el IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) publicó el estándar IEEE 802.15.7 [IEEE802.15.7-2011] que define el uso de VLC para redes WPAN (*Wireless Personal Area Networks*), definiendo las especificaciones de una capa física y una capa de control de acceso al medio - MAC (*Medium Access Control*) - para comunicaciones ópticas inalámbricas basadas en luz visible.

Como parte de las especificaciones del estándar IEEE 802.15.7, en la capa MAC se define un procedimiento de acceso al medio con contención, basado en el método CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) [Chen94]. De acuerdo a este procedimiento, cuando un nodo de la red desea transmitir, debe realizar antes una *detección de portadora* con el fin de detectar posibles transmisiones que estén siendo realizadas por otros nodos. En el caso de que no se detecten transmisiones, se considera que el medio está disponible y se puede proseguir para efectuar la transmisión.

El problema del nodo oculto es un problema bien conocido en las redes inalámbricas basadas en radio frecuencia que emplean métodos de acceso al medio como el CSMA/CA [Jang12] [Wijetunge11]. Dicho problema está producido por las limitaciones en el alcance de la señal en el medio de transmisión, y ocasiona que en la red haya nodos cuyas transmisiones no sean detectadas por otros nodos, lo que puede dar lugar a que se produzcan colisiones por la transmisión simultánea de varios de ellos. Como consecuencia de este problema, puede producirse una degradación importante en el rendimiento de las comunicaciones realizadas en la red.

Debido a las características de directividad de los dispositivos de transmisión y recepción ópticos, los nodos de una red VLC presentan limitaciones en su capacidad para detectar las transmisiones realizadas en el medio óptico, lo que puede agravar los

efectos producidos por el problema del nodo oculto. La existencia del problema del nodo oculto en las redes VLC fue puesta de manifiesto en trabajos publicados durante la elaboración del estándar IEEE 802.15.7, como [Le10], y en algunos de los documentos de trabajo [Jang09] del grupo responsable de la elaboración de dicho estándar. No obstante, en la versión actual del estándar no se incluyen mecanismos diseñados específicamente para solventar este problema.

Desde que se publicara el estándar en 2011, no hay constancia de estudios ni trabajos publicados donde se evalúe el efecto de los nodos ocultos en las comunicaciones realizadas mediante el procedimiento CSMA/CA. Existen diversos trabajos publicados, como [Nobar15], que evalúan el rendimiento de las comunicaciones realizadas mediante CSMA/CA, pero en ellos no se consideran las características de directividad de los dispositivos, ni se modela la propagación de la señal óptica en el medio de transmisión. En consecuencia, en los resultados presentados en dichos trabajos no se han considerado los efectos que el problema del nodo oculto tiene en el estándar IEEE 802.15.7.

La necesidad de evaluar el impacto del problema del nodo oculto en las redes IEEE 802.15.7 ha sido una de las motivaciones que han dado lugar al trabajo de investigación realizado para esta tesis, conjuntamente con la búsqueda de una solución que permita eliminar o mitigar los efectos de dicho problema en este tipo de redes.

1.2 Objetivos y aportaciones de la presente tesis doctoral

El primer objetivo de esta tesis es analizar y evaluar los efectos del problema del nodo oculto sobre las prestaciones de funcionamiento de las redes VLC basadas en el estándar IEEE 802.15.7. Para poder realizar el análisis propuesto, se ha desarrollado un modelo de simulación con el que poder evaluar el rendimiento de las comunicaciones en diferentes escenarios y bajo distintas condiciones de funcionamiento. Los efectos del problema del nodo oculto se evalúan comparando los resultados de simulaciones realizadas cuando no hay nodos ocultos con resultados de simulaciones en las que sí existen nodos ocultos en la red.

El segundo objetivo planteado para esta tesis es realizar una propuesta de solución al problema del nodo oculto en las redes IEEE 802.15.7. Para elegir el modelo de solución a proponer se analizan diversas soluciones existentes, propuestas tanto para

redes VLC como para redes basadas en radio frecuencia. La solución propuesta se ha elegido teniendo en cuenta su eficacia, su viabilidad, y el grado de complejidad de su implementación en las redes IEEE 802.15.7. A través del modelo de simulación implementado se evalúan los resultados obtenidos con la solución propuesta, analizando su validez en distintos escenarios y diferentes condiciones de funcionamiento de la red.

1.3 Descripción del documento

El presente documento presenta el trabajo de investigación realizado para esta tesis, estando dividido en los siguientes capítulos:

En el capítulo 2 se introducen los fundamentos y el estado del arte de las tecnologías en que se basan los sistemas de comunicaciones ópticas no guiadas basados en luz visible. Se presentan las ventajas de estas tecnologías, sus aplicaciones, y los principales retos a afrontar por las mismas. Se exponen también las causas que dan lugar al problema del nodo oculto en el contexto de las redes basadas en dichas tecnologías.

En el capítulo 3 se exponen las principales características del estándar IEEE 802.15.7 para redes inalámbricas de área personal, basadas en comunicaciones ópticas no guiadas con luz visible. Se detallan especialmente aquellas características del estándar que más tienen que ver con el objeto de este trabajo.

En el capítulo 4 se presenta una descripción del modelo de simulación, implementado para analizar las prestaciones de las comunicaciones basadas en el procedimiento CSMA/CA definido en el estándar IEEE 802.15.7.

En el capítulo 5 se analizan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas, evaluándose los efectos que el problema del nodo oculto tiene en el rendimiento de las comunicaciones en la red.

En el capítulo 6 se presenta la propuesta de solución diseñada para resolver el problema del nodo oculto, analizándose su efectividad a través de los resultados obtenidos con el modelo de simulación.

En el capítulo 7 se exponen las conclusiones más relevantes obtenidas de la realización de este trabajo, y se proponen las líneas futuras a seguir.

2. Fundamentos y estado del arte

En este capítulo se introducen los fundamentos y el estado del arte de la tecnología en que se basan los sistemas de comunicaciones ópticas no guiadas basados en luz visible. Se presentan las principales ventajas de estas tecnologías, se resumen sus principales aplicaciones, y se exponen los principales retos a afrontar en su desarrollo e implantación. Se presenta la evolución de las principales normativas y estándares relativos a estas tecnologías, y se exponen los principios de análisis y caracterización del modelo de canal óptico empleado en los trabajos de simulación de esta tesis. Se finaliza exponiendo el problema del nodo oculto en el contexto de las redes basadas en estas tecnologías.

2.1 Comunicaciones ópticas no guiadas mediante luz visible

Las comunicaciones ópticas no guiadas se basan en la transmisión de señales portadoras ópticas - en la banda visible, infrarroja o ultravioleta - a través de un medio de propagación no guiado [Borah12]. Esta modalidad de comunicaciones se aplica en sistemas destinados para uso tanto en entornos interiores como exteriores, abarcando un amplio rango de escalas en cuanto a distancias: desde sistemas de corto alcance para redes de área personal hasta redes de acceso metropolitanas [Boucouvalas15]. Durante la última década, estos sistemas de comunicaciones han experimentado un aumento significativo en el ancho de banda, y una disminución importante en su costo de fabricación.

Las comunicaciones ópticas no guiadas basadas en luz visible, cuyas tecnologías se denominan mediante las siglas VLC, se centran específicamente en el uso de la parte del espectro electromagnético que es detectable por el ojo humano. El uso del espectro visible ha ido ganado cada vez más interés gracias a su disponibilidad y a la facilidad con la que la luz puede modularse mediante diodos LED [Burton12] [Choi12].

Dos factores que potencian aún más el interés en los sistemas basados en tecnologías VLC son la floreciente industria de fabricación de dispositivos móviles y la rápida evolución de los sistemas de iluminación basados en LED [Haitz00] [Zhou07].

En los equipos transmisores VLC se modula la intensidad de los emisores de luz LED [Karunatilaka15] de forma que el parpadeo no es perceptible por el ojo humano. En los equipos receptores, las señales ópticas son demoduladas y convertidas en señales eléctricas mediante detectores fotosensibles [Komine04]. Debido a su mayor eficiencia en comparación con otras fuentes de luz, los diodos LED se vienen usando cada vez más en sistemas de iluminación y presentación [mckinsey12], entre los que podemos citar a las lámparas de bajo consumo, los sistemas de señalización luminosa de tráfico, las pantallas planas y los equipos de instrumentación.

2.1.1 Ventajas de las tecnologías VLC

Las tecnologías VLC presentan múltiples ventajas, en comparación con las tecnologías de radio frecuencia en que se basan la mayoría de las redes inalámbricas existentes [Bhalerao14] [Jovicic13]:

- El rango de frecuencias disponible en el espectro de la luz visible es hasta 10.000 veces superior al del espectro de las señales de radio frecuencia, y esta disponibilidad de ancho de banda permite el uso de velocidades de transmisión de datos mucho más altas. Al no requerir de licencias de uso, el espectro de la luz visible abre la oportunidad a la existencia de comunicaciones de banda ancha y bajo coste que pueden paliar la congestión existente en las bandas ISM (*Industrial Scientific and Medical*) empleadas en muchas de las redes inalámbricas existentes.
- Las comunicaciones VLC presentan una alta capacidad de reutilización espacial al no existir interferencias entre señales ópticas de recintos adyacentes, dado que la luz visible no puede atravesar las paredes. Con ello se posibilita una mayor

densidad espacial en las comunicaciones, en comparación con los sistemas basados en radio frecuencia, ya que éstos pueden interferirse cuando se encuentran en ubicaciones próximas.

- Al estar limitado el alcance de las señales VLC al área del recinto iluminado por la fuente de luz se mejora la seguridad de las comunicaciones, previniéndose la posible interceptación de las señales. Además, gracias a las longitudes de onda de la luz visible es posible tener un mayor control de la directividad en la propagación, a diferencia de lo que ocurre en los sistemas basados en radio frecuencia. En consecuencia, las técnicas de seguridad usadas en otras tecnologías de redes inalámbricas como Wi-Fi o Bluetooth no son esenciales en VLC. La directividad en la propagación de la señal óptica también hace factible el uso de VLC para el posicionamiento de dispositivos móviles en recintos interiores.
- Las tecnologías VLC actuales se basan en comunicaciones no coherentes - en lo referente a la señal portadora óptica - con lo que los componentes de los transmisores y receptores son más simples y económicos que los empleados en las tecnologías basadas en radio frecuencia. Por otro lado, la potencia adicional requerida para transmitir datos en VLC es prácticamente despreciable cuando se emplean como transmisores equipos de iluminación que se encuentran normalmente encendidos.
- La exposición a la luz visible ha sido una constante en la evolución de la vida en la tierra. Aparte de los límites que se puedan establecer sobre la intensidad luminosa máxima, no se conocen necesidades de protección relacionadas con las tecnologías VLC que afecten a posibles problemas de salud. A diferencia de los sistemas de radio frecuencia, en VLC no se requieren antenas que puedan estar sometidas a restricciones de uso en entornos como hospitales o plantas químicas.

2.1.2 Aplicaciones de las tecnologías VLC

Se indican a continuación algunos de los campos más importantes de aplicación de las tecnologías VLC [Bhalerao14] [Zheng10]:

- **Domésticas**: VLC es una alternativa de bajo costo a las comunicaciones inalámbricas basadas en radio frecuencia, que permite aliviar la congestión

existente en el uso de las bandas ISM usadas en muchas de las redes inalámbricas actuales. Las lámparas de iluminación pueden ser usadas como puntos de acceso VLC, permitiendo que la misma infraestructura pueda ser usada para proporcionar servicios de iluminación y comunicación de datos.

Las tecnologías VLC también pueden ser usadas para la interconexión de sistemas de entretenimiento doméstico, como los sistemas de audio/vídeo inalámbricos o las consolas de videojuegos. En la figura 2.1 se muestra un ejemplo de sistema doméstico de iluminación integrado con VLC [Karunatilaka15].

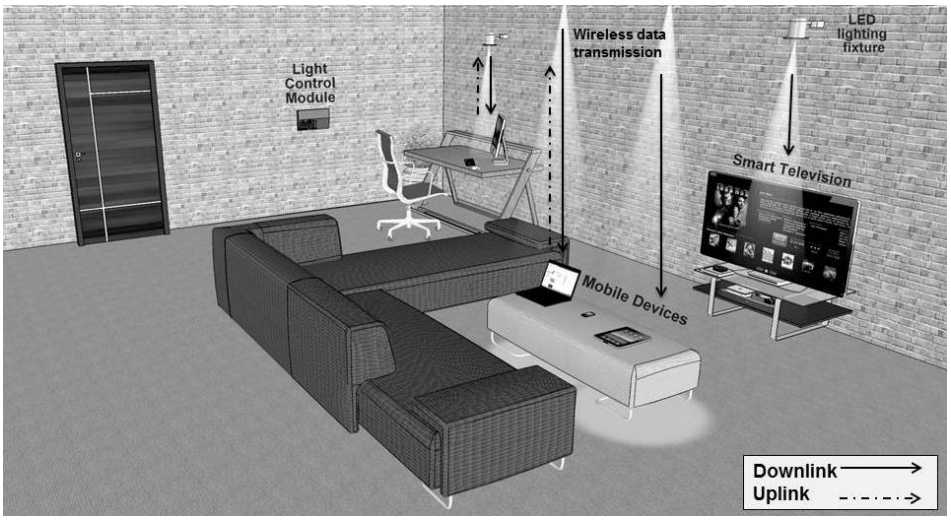


Figura 2.1 – Sistema de iluminación doméstico integrado con VLC.

- **Hospitalarias**: el buen funcionamiento de los sistemas y equipamientos médicos de los hospitales requiere de su aislamiento frente a interferencias electromagnéticas y de radio frecuencia. Las tecnologías VLC permiten la implantación de sistemas de comunicaciones que no produzcan tales tipos de interferencias.
- **Industriales**: las tecnologías VLC se pueden aplicar en sistemas de comunicación y localización en áreas interiores de entornos industriales, cuando las emisiones de radio frecuencia no están permitidas. También pueden emplearse en sistemas de iluminación para oficina, dotándolos de capacidad para comunicación de datos, aliviando la saturación en el uso de los sistemas y redes inalámbricas basadas en radio frecuencia.

- **Transporte**: los diodos LED se usan cada vez más en los faros de los automóviles, en los semáforos y en los sistemas de señalización de tráfico, pudiendo ser empleados para la comunicación entre vehículos, o entre vehículos y elementos de señalización vial. Las tecnologías VLC aplicadas a los sistemas inteligentes de transporte - denominados mediante las siglas ITS (*Intelligent Transportation Systems*) - facilitan mejoras en la seguridad del tráfico. En la figura 2.2 se muestra un ejemplo de comunicación entre vehículos basada en VLC.

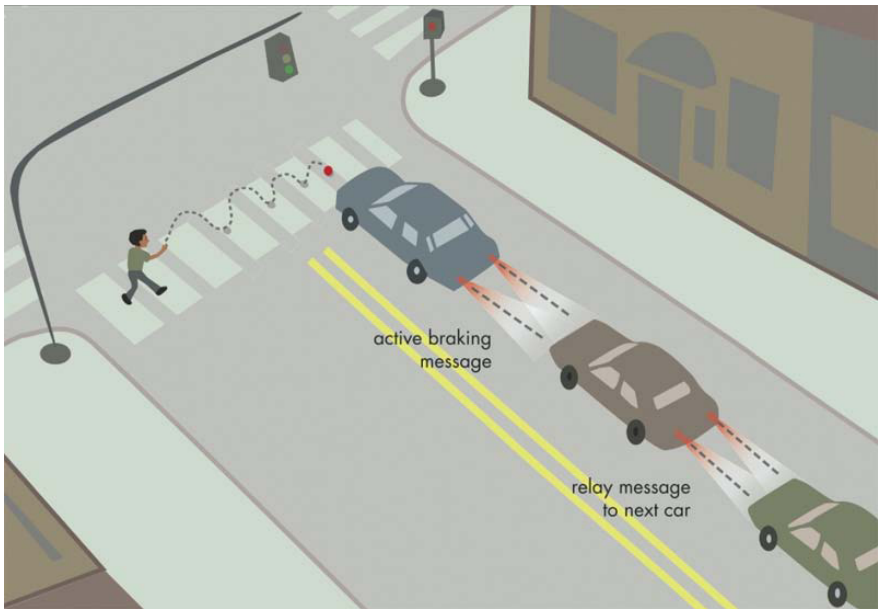


Figura 2.2 – Ejemplo de prevención de accidentes mediante ITS.

- **Seguridad militar y civil**: la capacidad de emisión direccional con altas velocidades de datos y el uso del espectro visible permiten el uso de VLC para sistemas en los que se requiere encubrir y proteger las comunicaciones. Las tecnologías VLC también son adecuadas en operaciones de rescate en caso de emergencias, gracias su capacidad de puesta en marcha e implantación en poco tiempo.
- **Sistemas de posicionamiento en interiores**: el uso de VLC permite obtener el posicionamiento con alta precisión de dispositivos móviles ubicados en recintos interiores, para los cuales no son adecuados los sistemas de posicionamiento basados en radio frecuencia como el GPS (*Global Positioning System*).

2.1.3 Principales retos sobre las tecnologías VLC

En el desarrollo y la implantación de las tecnologías VLC se plantean diversos retos a afrontar, de entre los que se destacan los expuestos a continuación [Bhalerao14] [George14]:

- **Comunicación en línea de visión**: en los sistemas LOS (*Line of Sight*) la señal óptica se propaga de forma directa del transmisor al receptor, para lo que es necesario que ambos se encuentren en línea de visión. La luz visible no atraviesa muchos de los objetos que usamos en nuestra vida diaria sino que es reflejada en ellos, lo que supone una ventaja desde el punto de vista de la seguridad y una desventaja desde el punto de vista del alcance [Komine04]. En los sistemas LOS, la necesidad de establecer un camino directo entre el transmisor y el receptor supone una limitación en cuanto a la movilidad de los terminales de usuario, al requerirse de un apuntamiento preciso entre transmisor y receptor. Además, la existencia de obstáculos interpuestos en la línea de visión del enlace puede provocar el corte de la comunicación.

  Por otro lado, cuando no hay línea de visión directa entre el transmisor y receptor la comunicación se ve limitada y dificultada por las pérdidas de energía producidas por las reflexiones de la señal, y por la distorsión sufrida por ésta a causa de la multipropagación [Saadi12]. Aún así, existe la posibilidad de transmitir datos en ausencia de línea directa de visión en los llamados sistemas difusos.

- **Adecuación de las fuentes de transmisión**: los diodos LED empleados en los equipos de iluminación actuales son seleccionados en base a sus prestaciones como dispositivos de iluminación, lo que en la práctica puede dificultar el uso de dichos equipos en sistemas de comunicación basados en tecnologías VLC. No obstante, existen diodos LED comerciales con características adecuadas para su uso en equipos de iluminación y aptos para VLC [Karunatilaka15].

- **Interferencias causadas por la luz ambiental**: las fuentes de luz natural y artificial del entorno reducen la relación señal a ruido y dificultan la recepción, especialmente cuando el nivel de la iluminación ambiente es alto

[Komine04]. El efecto de dichas interferencias puede reducirse mediante el uso de filtros ópticos, o mediante el procesamiento de la señal eléctrica obtenida a la salida del dispositivo foto detector [Karunatilaka15].

- **Comunicación bidireccional y acceso múltiple**: cuando se transmite empleando fuentes de iluminación, el uso de VLC se adapta de forma natural a aplicaciones de difusión con comunicaciones en sentido descendente - *downlink* - donde los receptores son los terminales manejados por los usuarios. Las comunicaciones en sentido ascendente - *uplink* – (desde los terminales hacia la fuente de iluminación) presentan diversos retos [O'Brien08], como el consumo eléctrico de los LED en los terminales móviles, las molestias producidas a los usuarios por las señales luminosas de los terminales, y las restricciones en la movilidad cuando se precisa mantener los terminales orientados hacia la fuente de iluminación [Karunatilaka15] [Pathak15].

  Para implementar las comunicaciones *uplink* se han planteado diferentes propuestas, como el empleo de la banda de infrarrojos [Pérez-Jimenez11] o el uso de radio frecuencia [Bao14]. En [Komine03] se propone un sistema VLC bidireccional mediante el uso de un transceptor retro-reflector en los terminales de usuario. Para lograr comunicaciones bidireccionales y entre múltiples dispositivos se recurre también a técnicas de multiplexación como TDM (*Time Division Multiplexing*) [Elgala11], o a técnicas de control de acceso al medio como las empleadas en el estándar IEEE 802.15.7 [IEEE802.15.7-2011].

- **Compatibilidad con la función de iluminación**: en la mayoría de los entornos industriales, comerciales y de oficina, siempre que hay personas en ellos se mantienen los sistemas de iluminación encendidos, no requiriéndose de consumo eléctrico adicional para su uso en VLC. Sin embargo, en los entornos domésticos es habitual tener la iluminación apagada durante el día. Por ello, para permitir el uso de VLC en entornos domésticos hay que mantener los sistemas de alumbrado encendidos durante el día, controlando que su brillo permanezca por debajo de los niveles de la iluminación ambiental. La potencia consumida en este caso es comparable a la consumida por los sistemas de radio frecuencia [Borogovac11].

- **Aumento de la velocidad de transmisión**: para lograr velocidades de transmisión elevadas en VLC se plantea la necesidad de usar técnicas de ecualización en el transmisor y/o en el receptor, y el uso de esquemas de modulación eficientes en cuanto al ancho de banda [Karunatilaka15]. También se ha propuesto el uso de técnicas de transmisión en paralelo, de tipo MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) [O'Brien08].
- **Normalización**: por último, hay que destacar el hecho de que las tecnologías VLC deben satisfacer tanto normativas propias de organismos reguladores del ámbito de las telecomunicaciones como normativas propias de otros campos, como las referentes a los sistemas de iluminación, a la seguridad ocular, o a la señalización del tráfico. Esto implica que para establecer estándares debe haber coordinación entre diferentes organismos de regulación de competentes en diversas disciplinas.

2.1.4 Organismos de normalización y estándares

Japón lideró la introducción de las tecnologías VLC a través del VLCC (*Visible Light Communication Consortium*) [vlcc13], constituido en el año 2003 por varias empresas tecnológicas japonesas. En junio de 2007, la JEITA (*Japan Electronics and Information Technology Industries Association*) [jeita15] publicó dos estándares para comunicaciones en luz visible basados en propuestas del VLCC:

- CP-1221: diseñado para la transmisión de datos a bajas velocidades, modulando la luz visible mediante el uso de subportadoras. Destinado para sistemas inalámbricos de identificación basados en iluminación con LED (LED-ID).
- CP-1222: que emplea un esquema de modulación diseñado para evitar el parpadeo, y que añade técnicas de CRC (*Cyclic Redundancy Checks*) para la detección de errores de transmisión. Admite mayor versatilidad en cuanto al tipo de datos que se pueden transmitir.

En octubre de 2008 el VLCC comenzó a trabajar en cooperación con la IrDA (*Infrared Data Association*) y la ICSA (*Infrared Communication Systems Association*), anunciándose en marzo de 2009 un estándar que adoptaba y expandía la capa física del estándar IrDA. La ICSA ha continuado los trabajos para desarrollar un estándar de red LAN (*Local Area Network*) que permita transmisión *full duplex*, mediante el uso de

multiplexación WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) usando las bandas de luz visible e infrarroja.

En el año 2007 se formó el grupo de trabajo para VLC (WG4021) de la TTA (*Telecommunications Technology Association of Korea*) [tta15], que desarrolló la especificación del estándar TTA 5 en 2008. Esta especificación abarca aspectos como la configuración de la capa física del transmisor y receptor, la configuración básica para la interfaz LED para iluminación y VLC, y la configuración del modelo de servicio de localización basada en luz. Este grupo de trabajo ha desarrollado otros estándares, como el TTA 16, cuyas especificaciones se centran en la convergencia de las tecnologías VLC y los sistemas de iluminación basados en LED.

En 2008 se fundó el proyecto OMEGA (*hOME Gigabit Access*), que cuenta con la cofinanciación de la Unión Europea y la participación de diversas entidades europeas del ámbito académico y de la industria. El objetivo de este proyecto es el desarrollo de estándares para redes domésticas que proporcionen servicios y suministren contenidos a velocidades de transmisión de hasta 1 Gbps, incluyéndose el uso de tecnologías de comunicación óptica inalámbrica en las bandas de infrarrojo y luz visible [ict-omega11].

A pesar de existir iniciativas de normalización como la citada en el párrafo anterior, en el mundo occidental es el IEEE [ieee15] el principal referente de estandarización en tecnologías VLC. Dentro del grupo de trabajo IEEE 802.15, que está dedicado a la normalización de las redes inalámbricas de área personal WPAN (*Wireless Personal Area Network*), en el año 2008 se creó el grupo de interés en VLC conocido como IEEE 802.15.7.

A principios de 2009, el grupo IEEE 802.15.7 comenzó a trabajar en la propuesta de un estándar de VLC que incluyera especificaciones para la capa física y la capa MAC. En el año 2011 se publicó el estándar IEEE 802.15.7-2011 [IEEE802.15.7-2011] que define el uso de VLC para redes WPAN, en el que se especifica la capa física y la capa MAC para comunicaciones ópticas inalámbricas de corto alcance usando luz visible, con velocidades de transmisión desde 11 Kbps hasta 96 Mbps.

En el año 2011 se funda en Oslo el Li-Fi (*Light-Fidelity*) Consortium [lificonsortium15] con el objetivo de promover el desarrollo y la distribución de tecnologías ópticas inalámbricas en las comunicaciones, la navegación, y otros campos de aplicación. La denominación *Li-Fi* ha sido empleada por varios autores, entre ellos el

profesor Harald Haas [ted11] de la Universidad de Edimburgo, para abarcar todo el conjunto de tecnologías y servicios relacionados con las comunicaciones ópticas inalámbricas basadas en luz visible.

En el año 2013 la JEITA publicó el estándar CP-1223, propuesto como una versión simplificada y mejorada del estándar CP-1222. En mayo de 2014 se constituyó la VLCA (*Visible Light Communications Association*) [vlca15] como organismo sucesor del VLCC, para continuar con la investigación, el desarrollo y la estandarización de las tecnologías VLC, contando con el apoyo de empresas líderes del sector de Japón.

Recientemente, el IEEE anunció la formación de un grupo de trabajo, el IEEE P802.15.7r1 [ieee80215] creado para elaborar una revisión del estándar IEEE 802.15.7-2011 que permita el uso de longitudes de onda del infrarrojo y el ultravioleta cercano además de la luz visible. Asimismo, se ha propuesto la inclusión de varias opciones adicionales que se resumen a continuación:

- Dotar a las cámaras fotográficas con capacidad de comunicación para aplicaciones de localización y posicionamiento, empleando distintas velocidades de transmisión. Para ello, se propone el uso del flash de la cámara como dispositivo transmisor y el sensor de imagen como dispositivo receptor.
- Soporte para sistemas inalámbricos de identificación basados en iluminación LED (LED-ID).
- Capacidad para comunicaciones inalámbricas *Li-Fi* bidireccionales con velocidades de, al menos, 10 Mbps, y soportando comunicación en red con movilidad e itinerancia (*roaming*) entre múltiples puntos de acceso.

Se prevé que el grupo de trabajo IEEE P802.15.7r1 elabore un primer borrador de la nueva revisión del estándar a finales del año 2016.

2.2 Configuraciones de los enlaces ópticos en VLC

Al igual que en otras formas de comunicación óptica inalámbrica, las configuraciones de los enlaces ópticos VLC en recintos interiores se pueden clasificar atendiendo a dos criterios: el grado de directividad del transmisor y receptor óptico, y la existencia o no de línea de visión directa entre ambos [Kahn97].

En cuanto a la directividad, cuando el transmisor y el receptor tienen, respectivamente, un diagrama de radiación y un campo de visión estrecho, se tiene la configuración de enlace *directivo*. Los enlaces directivos maximizan la eficiencia en cuanto a la potencia de transmisión, al reducirse en ellos las pérdidas por atenuación y minimizarse la recepción del ruido producido por la iluminación ambiental. Pero tienen como inconveniente la limitación en la movilidad de los terminales, al requerirse un alineamiento preciso entre ambos extremos de la comunicación.

Si se emplean dispositivos con diagramas de radiación y campos de visión amplios se dice que el enlace es *no directivo*. Los enlaces no directivos tienen la ventaja de favorecer la movilidad de los terminales, al no requerir de un alineamiento preciso para establecer la comunicación. Por otro lado, presentan desventajas por la distorsión producida en la señal recibida debido a la multipropagación, y por tener una menor eficiencia de potencia. También es posible la configuración de enlaces *híbridos*, combinando transmisores y receptores con distinto grado de directividad.

Cuando existe una línea de visión directa y sin obstáculos entre transmisor y receptor se tiene la configuración de enlace LOS (*Line of Sight*). En este tipo de enlaces se maximiza el aprovechamiento de la potencia transmitida y se minimizan los efectos de la distorsión por multipropagación, aunque la necesidad de línea de visión entre transmisor y receptor les resta flexibilidad de uso.

Por el contrario, en los enlaces sin línea de visión, o NLOS (*non-LOS*), se utiliza la reflexión como método de propagación, bien sea a través de una pared, techo u otras superficies capaces de reflejar el haz de luz. Los enlaces NLOS permiten la comunicación incluso en presencia de obstáculos, incrementando tanto la robustez como la facilidad de uso. Ambas características se maximizan en los enlaces NLOS no directivos, también llamados enlaces *difusos*.

VLC puede ser usado en diferentes configuraciones de enlace, como son los enlaces LOS directivos, los enlaces LOS no directivos, y los enlaces difusos – véase la figura 2.3. El uso de enlaces en configuración LOS permite alcanzar altas velocidades de transmisión, debido a la fuerte dependencia que existe entre la capacidad del canal y la presencia de una línea de visión directa entre transmisor y receptor [Grobe13].

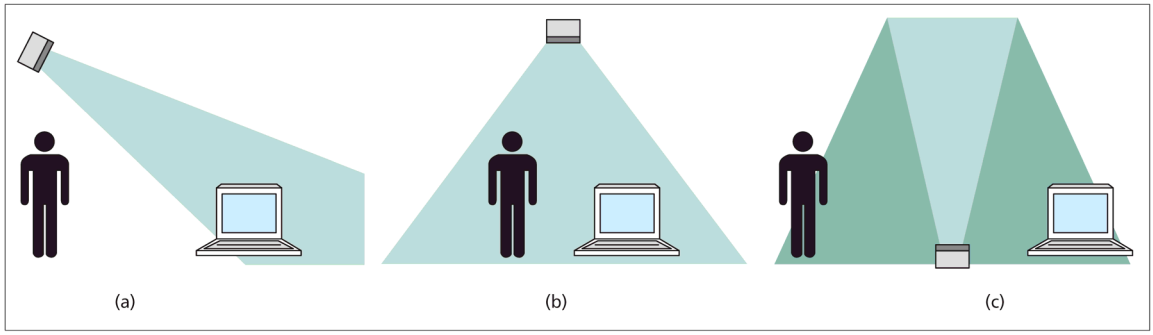


Figura 2.3 – Configuraciones de enlace óptico en VLC: a) LOS directivo; b) LOS no directivo; c) Difuso.

2.3 Caracterización del canal óptico

Los elementos que constituyen el canal óptico de un sistema VLC son el transmisor óptico (por ejemplo, el diodo LED), el medio de transmisión (el espacio libre) y el receptor óptico o foto detector. Al igual que en las comunicaciones ópticas no guiadas, en VLC se emplea la técnica de transmisión basada en modulación por intensidad IM (*Intensity Modulation*) en la que la luz emitida depende linealmente de la corriente que excita al LED. En recepción, la conversión optoeléctrica se realiza con detectores ópticos que emplean detección directa DD (*Direct Detection*), generando una corriente proporcional a la potencia óptica recibida.

En la figura 2.4 se presenta un esquema de modelo de canal VLC con IM/DD [Hranilovic05].

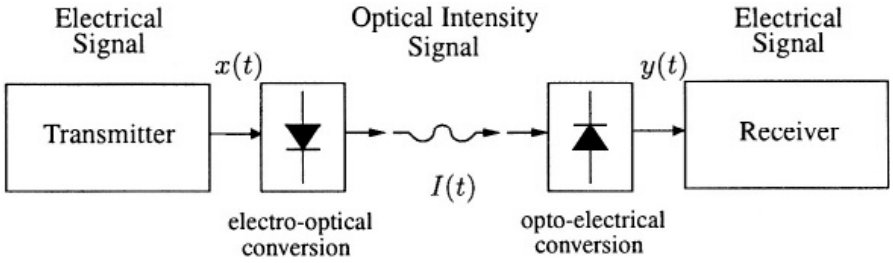


Figura 2.4 - Modelo de canal VLC con IM/DD.

Normalmente, los sistemas de comunicaciones ópticas no guiadas basados en IM/DD se modelan como sistemas lineales e invariantes en banda base. La figura 2.5 representa el esquema del canal óptico, modelado como un sistema lineal invariante en banda base [Kahn97], donde la entrada es la potencia instantánea radiada por la fuente

$X(t)$ y la salida es la corriente generada por el detector óptico $Y(t)$, siendo $h(t)$ la respuesta al impulso y $N(t)$ la componente de ruido aditivo independiente de la señal. R es la responsividad o factor de conversión óptico a eléctrico del detector óptico (en unidades de A/W).

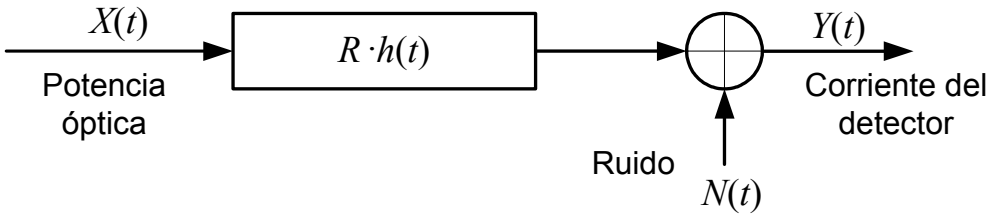


Figura 2.5 - Modelo de canal óptico como sistema lineal en banda base.

De acuerdo al modelo de canal descrito, la corriente generada en el fotodetector $Y(t)$ se puede calcular a partir de la convolución entre la potencia instantánea radiada por la fuente $X(t)$ y la respuesta al impulso del canal $h(t)$, mediante la ecuación:

$$Y(t) = R \cdot X(t) \otimes h(t) + N(t) \tag{2.1}$$

La respuesta al impulso del canal $h(t)$ viene determinada por la posición, la orientación, y las propiedades del transmisor y del receptor, así como por las posibles reflexiones de la señal óptica en el entorno. Se han publicado múltiples trabajos para caracterizar el canal óptico no guiado y su respuesta al impulso, entre los que se pueden citar, por ejemplo, los basados en métodos de evaluación de medidas [Kahn95], en simulaciones mediante algoritmos iterativos [López-Hernandez97], o en métodos estadísticos [González05]. También se han publicado diversos trabajos particularizando el estudio del canal a las características específicas de las comunicaciones basadas en luz visible, como [Lee11b], [Komine04] y [Chvojka15].

Con carácter general, al ser la respuesta en frecuencia del canal óptico $H(f)$ lo suficientemente plana en las proximidades del origen de frecuencias, se puede caracterizar la ganancia del canal mediante su ganancia en continua (DC, *Direct Current*) representada por $H(0)$ [Kahn97]. De esta forma, se puede relacionar la potencia media óptica transmitida, P_t , con la recibida, P_r , de acuerdo a la expresión:

$$P_r = H(0) \cdot P_t \tag{2.2}$$

La potencia óptica recibida en un canal óptico VLC se puede expresar, de forma general, como la combinación de dos términos: uno correspondiente a la componente en línea de visión directa, o componente LOS, y otro que engloba las reflexiones indirectas o non-LOS [Chvojka15].

En los canales LOS directivos, el cálculo de la respuesta al impulso $h(t)$ - y por consiguiente el cálculo de la ganancia del canal - se simplifica, al no considerarse la existencia de reflexiones indirectas. Esta simplificación permite reducir el costo computacional requerido para simular el funcionamiento de redes basadas en VLC con canales LOS directivos, como es el caso de las simulaciones realizadas en este trabajo de investigación.

2.3.1 Caracterización del transmisor óptico

De acuerdo a [Gfeller79], un transmisor óptico (un LED) puede ser modelado como una fuente de luz puntual y caracterizado por un vector de posición $\vec{p}_t$, un vector de orientación $\vec{o}_t$, y una potencia óptica emitida P_t. Considerando el transmisor con un perfil de radiación lambertiano con simetría axial, la expresión de la intensidad radiante emitida en la dirección θ viene dada por la ecuación 2.3:

$$I(\theta, m) = \begin{cases} \dfrac{m+1}{2\pi} \cdot P_t \cdot \cos^m(\theta), & \theta < \dfrac{\pi}{2} \\ 0, & \theta \geq \dfrac{\pi}{2} \end{cases} \tag{2.3}$$

En esta ecuación, m es el número modal que define la directividad del lóbulo de radiación del transmisor óptico. La relación entre el número modal m y el ángulo en el que la intensidad radiante se reduce a la mitad de su máximo, denominado ángulo de potencia mitad $\theta_{1/2}$, viene dada por:

$$m = \frac{-Ln2}{Ln[\cos(\theta_{1/2})}} \tag{2.4}$$

De acuerdo a (2.3), cuanto mayor es el número modal *m* mayor es la directividad del lóbulo de emisión del transmisor. Para ilustrar la relación entre *m* y la directividad, en la figura 2.6 se representan varios diagramas de radiación para distintos valores de *m*.

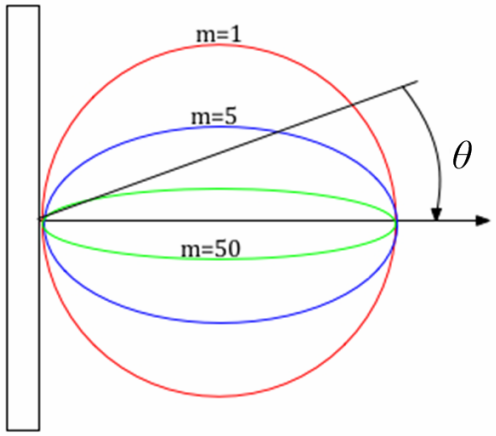


Figura 2.6 – Ejemplos de diagramas de radiación lambertianos.

En la caracterización del transmisor óptico hay que tener en cuenta también la eficiencia de conversión E_{ff} entre la potencia P_{et} de la señal eléctrica que lo modula en intensidad y la potencia óptica que éste emite P_t , de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P_t = E_{ff} \cdot P_{et} \tag{2.5}$$

2.3.2 Caracterización del receptor óptico

El receptor óptico queda caracterizado por un vector posición $\vec{p}_r$, un vector orientación $\vec{o}_r$, el área del elemento foto detector *A*, y el campo de visión o FOV (*Field of View*). Al ángulo formado entre la señal óptica incidente y el vector de orientación $\vec{o}_r$ del receptor se le llama ángulo de incidencia ψ. El campo de visión del receptor, FOV, es el máximo ángulo de incidencia ψ con el que la señal recibida puede ser detectada.

De esta forma, la potencia óptica detectada por el receptor resulta ser proporcional a su área efectiva de colección de luz $A_{eff}(\psi)$, la cual se puede expresar como:

$$A_{eff}(\psi) = \begin{cases} A \cdot \cos(\psi), & 0 \le \psi < FOV \\ 0, & \psi > FOV \end{cases} \tag{2.6}$$

En el caso de que el receptor disponga de un concentrador óptico - caracterizado por su ganancia $G(\psi)$ - y un filtro óptico - caracterizado mediante su coeficiente de transmisión $T(\psi)$ - la expresión del área efectiva $A_{eff}(\psi)$ resulta:

$$A_{eff}(\psi) = \begin{cases} A \cdot G(\psi) \cdot T(\psi) \cdot \cos(\psi), & 0 \le \psi < FOV \\ 0, & \psi > FOV \end{cases} \tag{2.7}$$

Como se indicó en (2.1), la responsividad R del foto detector es el factor de conversión entre la corriente eléctrica a su salida I y la potencia óptica incidente P_r:

$$R = \frac{I}{P_r} \quad [A/W] \tag{2.8}$$

De esta forma, la relación entre la potencia eléctrica media P_{er} a la salida del detector óptico y la potencia óptica incidente P_r vendrá dada por la expresión:

$$P_{er} = R^2 \cdot P_r^{\,2} \tag{2.9}$$

2.3.3 Ganancia del canal en configuración LOS

Como se ha indicado, en la configuración de enlace LOS directivo el cálculo de la respuesta al impulso $h(t)$, y por consiguiente el cálculo de la ganancia del canal $H(0)$, se simplifica notablemente al no tenerse en cuenta la existencia de reflexiones en la propagación de la señal óptica.

Al considerarse únicamente el camino directo en línea de visión, la ganancia del canal está determinada por la posición, la orientación, y las características del transmisor y del receptor. En la figura 2.7 se ilustra un ejemplo de transmisor y receptor en configuración de enlace LOS.

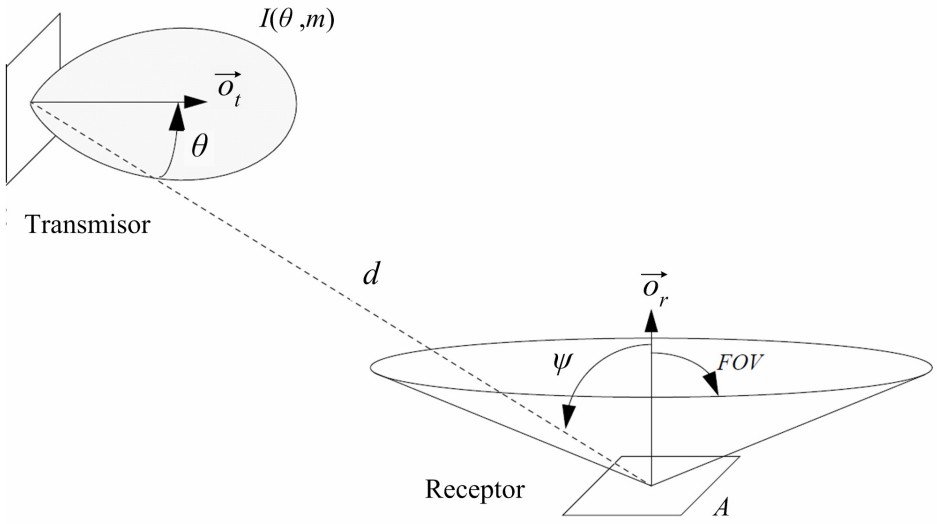


Figura 2.7 - Transmisor y receptor en configuración de enlace LOS.

Dado que se pretende caracterizar la ganancia del canal LOS para comunicaciones VLC en recintos interiores (con distancias de unos pocos metros), el principal efecto que se considera sobre la señal óptica producido por el medio de propagación es la atenuación causada por la distancia recorrida. El valor de dicha atenuación es igual a la inversa del cuadrado de la distancia *d* que separa al transmisor y al receptor [Chvojka15].

En las condiciones establecidas, si un transmisor óptico emite con una intensidad radiante $I(\Theta,m)$ a un receptor, situado a una distancia *d*, que forma un ángulo Θ respecto al transmisor, resultará una potencia óptica recibida igual a:

$$P_r = \frac{I(\theta,m)}{d^2} \cdot A_{eff}(\psi) \tag{2.10}$$

Sustituyendo (2.3) y (2.7) en (2.10), la potencia óptica recibida en el canal con configuración LOS directa resulta:

$$P_r = \begin{cases} \dfrac{m+1}{2\pi \cdot d^2} \cdot P_t \cdot \cos^m(\theta) \cdot A \cdot G(\psi) \cdot T(\psi) \cdot \cos(\psi), & 0 < \psi \le FOV \\ 0, & \psi > FOV \end{cases} \tag{2.11}$$

Con lo que la ganancia del canal $H(0)$ con configuración LOS directa vendrá dada por la expresión [Kahn97]:

$$H(0) = \frac{P_r}{P_t} = \begin{cases} \dfrac{m+1}{2\pi \cdot d^2} \cdot \cos^m(\theta) \cdot A \cdot G(\psi) \cdot T(\psi) \cdot \cos(\psi), & 0 < \psi \le FOV \\ 0, & \psi > FOV \end{cases} \tag{2.12}$$

Los transmisores ópticos que son también fuentes de iluminación están normalmente constituidos por múltiples fuentes de luz - diodos LED - para lograr el nivel adecuado de iluminación. En [Ding15] se analizan las implicaciones que tiene aplicar el modelo de canal con fuente de luz puntal para modelar sistemas VLC con transmisores formados por múltiples fuentes de luz, concluyéndose que las desviaciones en cuanto al calculo de la potencia óptica recibida son despreciables, incluso en el caso de fuentes constituidas por un gran número de LED.

2.3.4 Relación señal a ruido

Para la realización de la conversión óptica a eléctrica en el receptor se emplean normalmente fotodiodos PIN de silicio, que además de realizar la detección de la señal óptica recibida introducen un ruido adicional. En los sistemas VLC con detección directa existen dos fuentes de ruido principales: el ruido térmico producido por los componentes resistivos de la etapa de preamplificación del receptor, y el ruido *shot* (disparo) generado por la luz ambiente y otras fuentes de iluminación incidentes.

El ruido térmico se modela como una fuente de ruido gaussiano, y su varianza puede ser expresada, asumiendo un receptor con fotodiodo PIN y preamplificador con transistor FET (*Field Effect Transistor*) mediante la expresión [Komine04]:

$$\sigma^2_{térmico} = \frac{8 \cdot \pi \cdot k \cdot T_K}{G} \cdot \eta \cdot A \cdot I_2 \cdot B^2 + \frac{16 \cdot \pi^2 \cdot k \cdot T_K \cdot \Gamma}{g_m} \cdot \eta^2 \cdot A^2 \cdot I_3 \cdot B^3 \qquad (2.13)$$

Donde k es la constante de Boltzmann, T_K es la temperatura absoluta, G es la ganancia en tensión en bucle abierto, η es la capacidad del detector óptico por unidad de área, A es el área del detector óptico, Γ es el factor de ruido del canal FET, g_m es la transconductancia del FET, I_2 e I_3 son factores de ancho de banda de ruido, y B es el ancho de banda equivalente del ruido.

En los sistemas VLC de interiores, el ruido *shot* originado en los detectores ópticos se debe principalmente a la señal óptica recibida y a fuentes de luz ambiental, como la radiación solar que atraviesa las ventanas y las luminarias existentes en el recinto. El ruido *shot* puede modelarse como ruido aditivo gaussiano, con una varianza que puede aproximarse, a partir de [Komine04], mediante la expresión:

$$\sigma^2_{shot} = 2 \cdot q \cdot R \cdot P_r \cdot B + 2 \cdot q \cdot I_{bg} \cdot I_2 \cdot B \qquad (2.14)$$

Donde q es la carga del electrón, R la responsividad del fotodetector, P_r la potencia óptica recibida, B el ancho de banda equivalente del ruido, I_{bg} la corriente inducida por las fuentes de luz ambiental, e I_2 el factor de ancho de banda de ruido.

Como el ruido térmico y el ruido shot están incorrelados, el ruido total presente en el receptor VLC será la suma de ambos, resultando:

$$\sigma^2_{total} = \sigma^2_{térmico} + \sigma^2_{shot} \qquad (2.15)$$

Conocidas las potencias de la señal recibida y del ruido, puede obtenerse la expresión de relación señal a ruido *SNR* para el canal LOS directivo:

$$SNR = \frac{P_{er}}{\sigma^2_{total}} = \frac{R^2 \cdot P_r^2}{\sigma^2_{total}} \tag{2.16}$$

Donde P_r es la potencia óptica recibida por el foto detector, P_{er} la potencia eléctrica a su salida, R es su responsividad, y σ^2_{total} la potencia de ruido total.

El análisis y la caracterización del canal óptico en VLC considerando aspectos como las técnicas de modulación y codificación, la relación señal a ruido, y la tasa de error de bit BER (*Bit Error Rate*) es una línea de investigación abierta en la actualidad, en la que se vienen realizando y publicando múltiples trabajos, como [Zhang15], [Shoreh15] , [Biswal13] y [Sindhubala15].

2.4 El problema del nodo oculto en las redes VLC

El problema del nodo o terminal oculto es un problema bien conocido en las redes inalámbricas basadas en radio frecuencia, cuando utilizan procedimientos de control de acceso al medio basados en técnicas de contención, como el método CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) [Chen94].

El método CSMA/CA se fundamenta en que todo nodo de la red que quiera transmitir debe realizar antes una *detección de portadora*, "escuchando" el medio o canal con el fin de detectar posibles transmisiones que estén siendo realizadas por otros nodos. En el caso de que no se detecte actividad en el medio se considera que éste está libre y disponible para realizar la transmisión.

Los métodos CSMA/CA se emplean - con distintas variantes - en diversos estándares de redes inalámbricas basadas en radio frecuencia. Por ejemplo, se emplean en los protocolos MAC de las redes de área local inalámbricas [IEEE802.11-1997] y las redes de sensores inalámbricos [IEEE802.15.4-2006].

El problema del nodo oculto se produce cuando un nodo, después de realizar la detección de portadora, considera que el medio está disponible para transmitir por no detectar la transmisión de otro nodo cuya señal no es capaz de recibir. Como

consecuencia de este problema, al emplearse métodos de acceso al medio de tipo CSMA/CA pueden producirse transmisiones simultáneas de dos o más nodos que pueden dar lugar a colisiones.

En la figura 2.8 se muestra un ejemplo de escenario con nodos ocultos en una red inalámbrica con tres nodos: *A*, *B* y *C*. El límite del alcance de la transmisión de cada nodo se representa mediante un círculo alrededor del mismo (considerando propagación no directiva). Si el nodo *C* realiza una detección de portadora cuando el nodo *A* está transmitiendo al nodo *B*, el nodo *C* considerará que el medio está disponible (al no detectar la transmisión de *A*) y podrá transmitir al mismo tiempo, produciéndose una colisión en *B*.

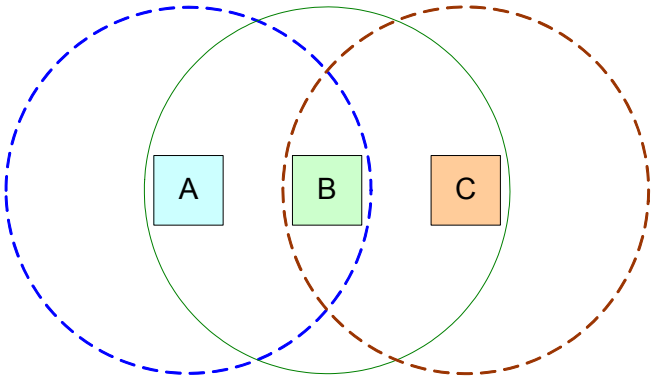


Figura 2.8 - Ejemplo de escenario con nodos ocultos en redes inalámbricas basadas en radio frecuencia.

Los efectos del problema del nodo oculto en las redes inalámbricas basadas en radio frecuencia han sido ampliamente estudiados y evaluados en diversos de trabajos, destacando para las redes IEEE 802.11 los trabajos de [Yang09], [Ekici08] y [Jang12], y para redes IEEE802.15.4 a [Harthikote-Matha07] y [Wijetunge11].

En las redes basadas en VLC se produce también el problema del nodo oculto, con efectos similares al problema de las redes de radio frecuencia, pero agravado por las características directivas de los transmisores y receptores ópticos (analizadas en el apartado 2.3), que se resumen a continuación:

- **Transmisor**: el número modal *m* define el grado de directividad del lóbulo de radiación. Dicho número modal está relacionado con el ángulo de potencia mitad

$\theta_{1/2}$, que es ángulo en el que la intensidad radiante emitida se reduce a la mitad de su valor máximo.

- **Receptor**: el campo de visión FOV (*Field of View*) define el ángulo máximo de incidencia, ψ, medido respecto al vector de orientación del receptor, en el que la señal óptica incidente puede ser detectada.

En la figura 2.9 se ilustra un ejemplo de escenario de red VLC en el que se presenta el problema del nodo oculto En este ejemplo, dos terminales de usuario intentan realizar una transmisión *uplink* hacia un dispositivo de infraestructura (de iluminación) ubicado en el techo del recinto. En la red se emplea un procedimiento de control de acceso al medio basado en el método CSMA/CA.

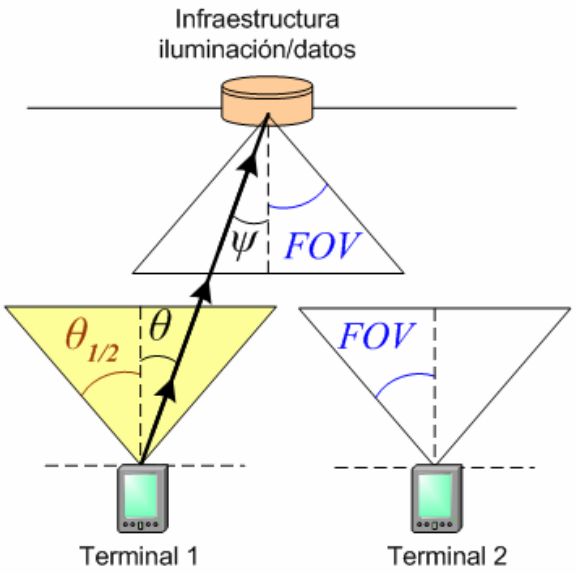


Figura 2.9 - Ejemplo de escenario con nodos ocultos en redes VLC.

En la figura 2.9, si el terminal 2 realiza una detección de portadora mientras el terminal 1 está transmitiendo a la infraestructura, debido a la directividad del transmisor óptico del terminal 1 ($\theta_{1/2}$) y del receptor óptico del terminal 2 (*FOV*), la señal del terminal 1 no es detectada por el terminal 2. En consecuencia, el terminal 2 considerará que el medio está disponible y podrá transmitir al mismo tiempo que el terminal 1, produciéndose una colisión en la infraestructura.

Como se verá en detalle en el capítulo 3, el estándar IEEE 802.15.7 define en su capa MAC un procedimiento de acceso al medio basado en el método CSMA/CA, por lo que las transmisiones *uplink* realizadas siguiendo este procedimiento son susceptibles de sufrir el problema del nodo oculto aquí descrito. Esta situación fue puesta de manifiesto en algunos trabajos publicados durante la elaboración del estándar [Le10] y en algunos de los documentos con propuestas para su toma en consideración [Jang09] por el grupo responsable de la elaboración del estándar. No obstante, en la versión actual del estándar [IEEE802.15.7-2011] no existen mecanismos diseñados específicamente para solventar este problema.

Por otro lado, como se indicará en el apartado 4.3, en base a los trabajos publicados conocidos por el autor de esta tesis, hasta la fecha no existen estudios que evalúen el impacto de la presencia de nodos ocultos sobre las prestaciones de las comunicaciones *uplink* realizadas mediante CSMA/CA en el estándar IEEE 802.15.7.

3. El estándar IEEE 802.15.7

En este capítulo se presentan las principales características del estándar IEEE 802.15.7 [IEEE802.15.7-2011] para redes inalámbricas de área personal, WPAN, basadas en la tecnología VLC, redes que son denominadas mediante las siglas VPAN (*Visible-light Communication Personal Area Network*).

3.1 Introducción

El objetivo de esta norma es proporcionar un estándar para comunicaciones ópticas inalámbricas de corto alcance basadas en luz visible, haciendo uso del espacio libre como medio de propagación, para lo que define una capa física (PHY) y una capa de control de acceso al medio (MAC). El estándar IEEE802.15.7 provee velocidades de transmisión suficientes para soportar servicios de comunicaciones multimedia, proporciona soporte para la movilidad, y ofrece compatibilidad con las infraestructuras de iluminación, cumpliendo también con las normativas aplicables en cuanto a seguridad ocular.

Algunas de las características más importantes que se pueden destacar del estándar son:

a) Operación en tres topologías de red: estrella, *peer-to-peer* y difusión.

b) Transmisiones programadas o realizadas mediante técnicas de acceso al medio con contención.

c) Transferencias de datos fiables mediante el uso de tramas de confirmación.

d) Indicación de la calidad del canal óptico, WQI (*Wavelength Quality Indication*).

e) Soporte para el control de la luminosidad (*dimming*).

f) Soporte para la función de iluminación.

g) Soporte para funciones basadas en el uso del color.

3.2 Tipos de dispositivos

El estándar clasifica los dispositivos en tres tipos: infraestructura (fijos), móviles, y vehículos. Las características de cada tipo de dispositivo se indican en la tabla 3.1.

	Infraestructura	**Móvil**	**Vehículo**
Coordinador fijo	Sí	No	No
Fuente de alimentación	Ilimitada	Limitada	Moderada
Factor de forma	No restringido	Restringido	No restringido
Fuente de luz	Intensa	Débil	Intensa
Movilidad física	No	Sí	Sí
Alcance	Corto/largo	Corto	Largo
Velocidad de transmisión	Alta/baja	Baja	Alta

Tabla 3.1 – Tipos de dispositivos y sus características.

3.3 Topologías de red

Se definen tres topologías de red: estrella, *peer-to-peer* y difusión. Dichas topologías se ilustran en la figura 3.1, resumiéndose a continuación sus principales características:

- **Estrella**: la comunicación se realiza entre varios dispositivos y un único controlador central, al que se denomina coordinador. Normalmente, en esta topología el coordinador es un dispositivo de infraestructura de iluminación, conectado a la red eléctrica, y con capacidad para transmitir y recibir datos. El resto de dispositivos son terminales móviles alimentados por baterías. Cada red en estrella tiene un identificador de VPAN único que establece el coordinador, al que deben asociarse los dispositivos móviles para poder comunicarse. Cada VPAN opera de forma independiente a otras VPAN que puedan existir en su mismo ámbito de cobertura.
- ***Peer-to-peer***: permite a dos dispositivos cualesquiera comunicarse entre sí, siempre que estén al alcance uno de otro. Uno de los dispositivos debe actuar como coordinador de la comunicación.
- **Difusión**: un dispositivo hace de coordinador y transmite su señal a otros dispositivos de forma unidireccional, sin necesidad de que haya ningún proceso de asociación.

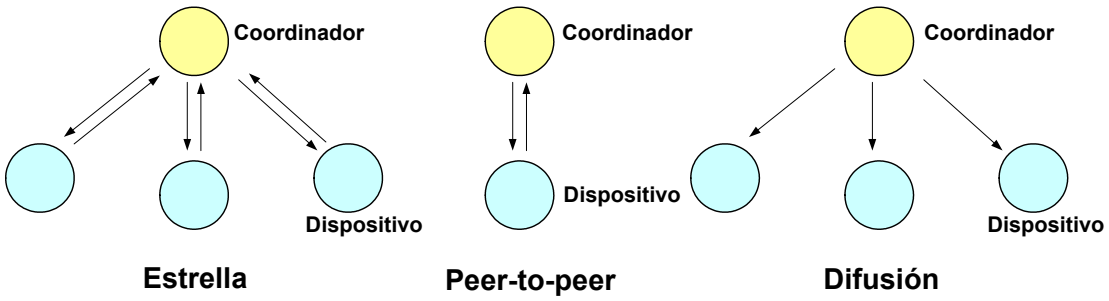


Figura 3.1 – Topologías de red en el estándar IEEE 802.15.7.

3.4 Arquitectura de un dispositivo

La arquitectura de un dispositivo IEEE 802.15.7 se compone de dos capas cuya especificación es objeto del estándar: una capa física (PHY), que incluye al transceptor óptico, y una capa MAC, que proporciona acceso al medio o canal óptico. En la definición de la arquitectura se incluyen también varias capas adicionales. La figura 3.2 muestra de forma gráfica el conjunto de capas de la arquitectura.

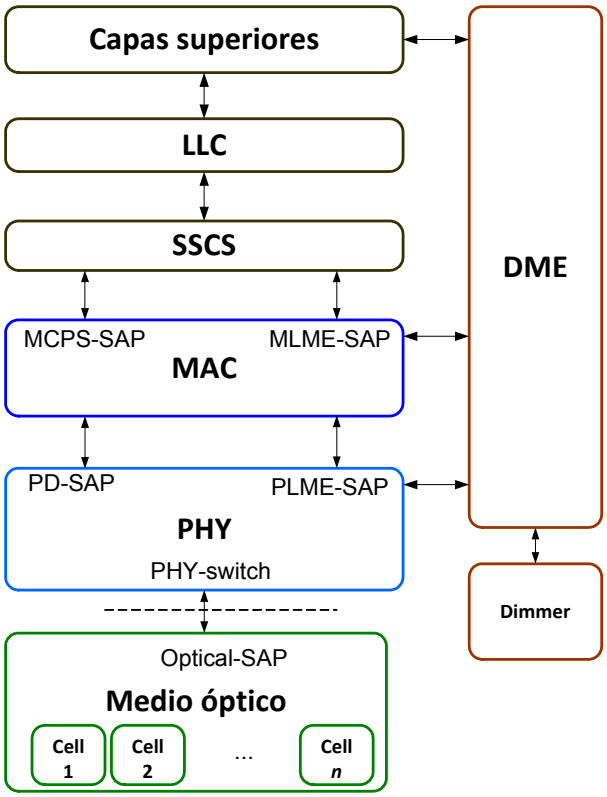


Figura 3.2 – Arquitectura de un dispositivo IEEE 802.15.7.

A continuación se describen brevemente las distintas capas definidas en la arquitectura:

- **Capa PHY**: la capa física (PHY) proporciona la interfaz entre la capa MAC y el canal óptico, y es proveedora de dos servicios: el servicio de datos, al que se accede a través del PD-SAP (*PHY Data Service Access Point*), y el servicio de gestión, al que se accede mediante el PLME-SAP (*PLME Service Access Point*). La entidad PLME (*Physical Layer Management Entity*) proporciona el servicio de gestión, siendo responsable de mantener una base de datos con los objetos gestionados por la

capa PHY. El PHY-*switch* hace de interfaz entre la capa PHY y el punto de acceso al servicio *optical SAP* para la conexión con el medio óptico.

- **Medio óptico**: los transmisores y receptores ópticos del dispositivo se consideran parte del medio óptico. Cuando hay más de un transmisor y receptor, la capa PHY permite dar soporte a la comunicación en múltiples celdas. El *optical* SAP (*Service Access Point*) provee la interfaz de acceso al medio óptico, aunque no es objeto de especificación del estándar.

- **Capa MAC**: proporciona el servicio de datos para la transmisión y recepción de tramas MPDUs (*MAC Protocol Data Units*) a través del servicio de datos de la capa PHY, y el servicio de gestión, que proporciona funciones como la gestión de tramas baliza (*beacon*), el acceso al canal de transmisión, y la asociación/disociación de dispositivos. También proporciona funciones como el soporte de visibilidad y el control de la luminosidad. Para acceder al servicio de datos de la capa MAC se utiliza el MCPS-SAP (*MAC Common Part Sublayer Service Access Point*), y para acceder al servicio de gestión el MLME-SAP (*MAC Sublayer Management Entity Service Access Point*).

- **Capa LLC y subcapa SSCS**: la capa LLC (*Logical Link Control*) implementa el modo de operación IEEE 802.2 Tipo 1 [IEEE802.2-2013] y proporciona la interfaz con la capa de red. La subcapa SSCS (*Service-Specific Convergence Sublayer*) [IEEE802.15.7-2011] proporciona el acceso de la capa LLC a los servicios de la capa MAC.

- **Capas superiores**: entre éstas se incluye a la capa de red - que incluye funciones como la configuración de la red y el encaminamiento - y la capa de aplicación, que proporciona la función para la que el dispositivo ha sido diseñado. La definición de estas capas no concierne al estándar IEEE 802.15.7.

- **DME y *dimmer***: el estándar soporta la existencia de un DME (*Device Management Entity*) que hace de interfaz entre los servicios de gestión de las capas PHY y MAC y un dispositivo regulador de luminosidad (*dimmer*).

3.5 La capa PHY

La capa PHY del estándar IEEE 802.15.7 es responsable de las siguientes funciones:

- Transmisión y recepción a través del medio óptico.
- Activación y desactivación del transceptor óptico (conjunto transmisor/receptor).
- Detección del estado del canal o medio óptico de transmisión
- Corrección de errores de transmisión.
- Sincronización.
- Medida del nivel de calidad de cada trama recibida mediante el WQI (*Wavelength Quality Indicator*). El WQI caracteriza la potencia y la calidad de las tramas recibidas con un valor numérico, que puede ser calculado empleando la detección de energía en el receptor, la relación señal a ruido, o una combinación de ambos.

De las funciones y características de la capa PHY del estándar IEEE 802.15.7 se detallarán a continuación sólo aquellas más relacionadas con los objetivos del trabajo realizado en esta tesis.

3.5.1 Modos de operación PHY

La capa PHY soporta tres modos de funcionamiento, que permiten el uso de distintas velocidades de transmisión, dan soporte a diferentes tipos de dispositivos ópticos de transmisión y recepción, y se adaptan a diversos entornos de funcionamiento:

- **PHY I**: destinado principalmente a aplicaciones en exteriores con bajas velocidades de transmisión (desde 11,6 Kbps a 266,6 Kbps) empleando tramas de pequeña longitud. Emplea modulación OOK (*On-Off Keying*) y VPPM (*Variable Pulse Position Modulation*), con codificación de línea RLL (*Run Length Limited*) para facilitar la recuperación del reloj, mantener el nivel de componente continúa y limitar el parpadeo visual. Soporta codificación RS (Reed-Solomon) y códigos convolucionales para corrección de errores FEC (*Forward Error Correction*).

- **PHY II**: para aplicaciones en interiores y exteriores, con mayores velocidades de transmisión (de 1,25 Mbps a 96 Mbps) y tramas de mayor tamaño. Emplea modulación OOK y VPPM, así como códigos de línea RLL, pero sólo soporta códigos RS para corrección de errores FEC.
- **PHY III**: para aplicaciones con múltiples transmisores y receptores ópticos trabajando en diferentes frecuencias (colores). Emplea la técnica de modulación CSK (*Color-Shift Keying*) [Singh13], con codificación RS, y velocidades de transmisión que van desde los 12 Mbps a los 96 Mbps.

Cada modo de funcionamiento de la capa PHY admite el uso de diferentes combinaciones de velocidades de transmisión, frecuencias de reloj óptico[1], técnicas de modulación, códigos de línea, y técnicas de codificación para corrección de errores. A cada una de las configuraciones de los citados parámetros se la denomina con un identificador de modo de operación o MCS-ID (*Modulation Coding Scheme Identifier*).

En la tabla 3.2 se muestran los distintos MCS-ID del modo de funcionamiento PHY II. El MCS-ID 16 corresponde a la frecuencia de reloj[2] y velocidad de transmisión más bajas, y ha de ser soportado obligatoriamente por cualquier dispositivo que emplee el modo PHY II.

Los distintos modos de funcionamiento de la capa PHY pueden coexistir pero no operar entre ellos. Un dispositivo compatible con el estándar IEEE 802.15.7 debe implementar al menos uno de los modos de funcionamiento PHY I o PHY II. En el caso de que implemente el modo PHY III debe implementar también el modo PHY II.

[1] De acuerdo al estándar, se entiende por frecuencia de la señal de reloj óptico a la frecuencia de la señal de reloj con que los datos son generados y enviados al transmisor óptico.

[2] En adelante, cualquier mención hecha en este documento relativa a frecuencias o ciclos de reloj será referida a las frecuencias o ciclos de la señal de reloj óptico.

Modulación	Código RLL	Frecuencia de reloj	FEC	Velocidad de transmisión	MCS-ID
VPPM	4B6B	3,75 MHz	RS (64,32)	1,25 Mbps	16
			RS (160,128)	2 Mbps	17
		7,5 MHz	RS (64,32)	2,5 Mbps	18
			RS (160,128)	4 Mbps	19
			ninguno	5 Mbps	20
OOK	8B10B	15 MHz	RS (64,32)	6 Mbps	21
			RS (160,128)	9,6 Mbps	22
		30 MHz	RS (64,32)	12 Mbps	23
			RS (160,128)	19,2 Mbps	24
		60 MHz	RS (64,32)	24 Mbps	25
			RS (160,128)	38,4 Mbps	26
		120 MHz	RS (64,32)	48 Mbps	27
			RS (160,128)	76,8 Mbps	28
			ninguno	96 Mbps	29

Tabla 3.2 – Configuraciones MCS-ID para el modo PHY II.

Dada la multiplicidad de frecuencias de reloj existentes según los distintos MCS-ID de cada PHY, es necesario un proceso de negociación durante la inicialización de la comunicación, para determinar el reloj a usar en la comunicación entre dos dispositivos. Dicha negociación es realizada por la capa MAC. Para facilitar la interoperabilidad entre dispositivos que soporten un mismo modo PHY el estándar establece varios requisitos:

- Si se implementa un modo de funcionamiento PHY, es obligatorio soportar el reloj del MCS-ID con la frecuencia de reloj más baja de dicho PHY.
- Si un dispositivo soporta una determinada frecuencia de reloj, debe soportar todas las frecuencias menores del PHY correspondiente.
- Si se soporta una determinada frecuencia de reloj, es obligatorio soportar todas las velocidades de transmisión asociadas a dicha frecuencia.

3.5.2 Formato de la trama PHY

La trama PHY o PPDU (*Physical Layer Data Unit*) se divide en tres partes principales: el preámbulo o cabecera de sincronización SHR (*Syncronization Header*), la cabecera física PHR (*PHY Header*) y la carga útil ó PHY *Payload*. En la figura 3.3 se ilustra el formato general de la PPDU.

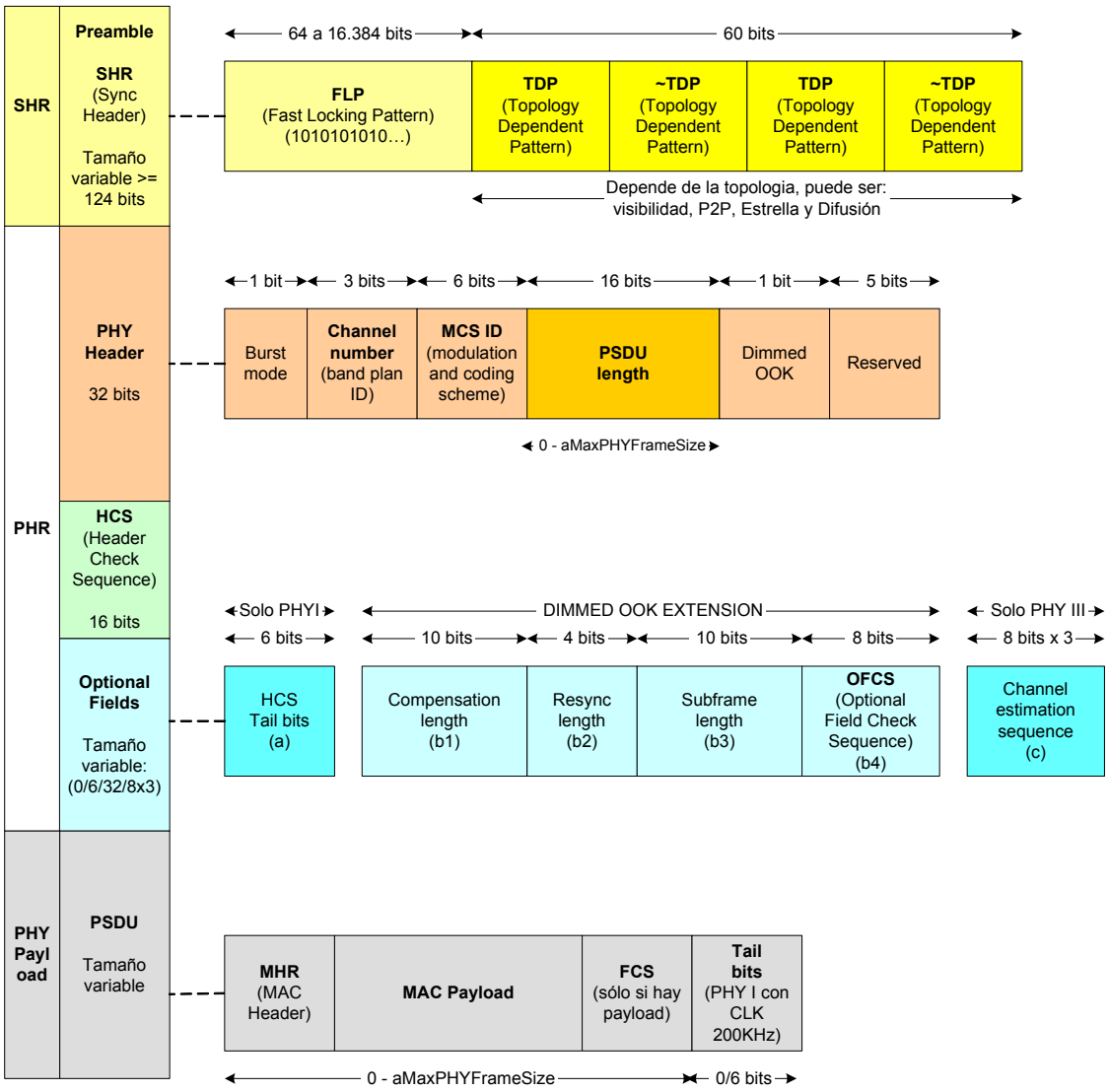


Figura 3.3 – Formato general de la PPDU.

A continuación se describe brevemente el significado de los campos de cada una de las partes de la PPDU.

SHR (*Synchronization Header*)

La cabecera de sincronización o preámbulo permite que el transceptor óptico logre la sincronización del reloj al inicio de la recepción de la PPDU. Se transmite a la frecuencia de reloj negociada, con modulación OOK, y sin codificación RLL ni FEC. Está dividida en dos partes:

- *FLP* (*Fast Locking Pattern*): patrón formado por una secuencia de unos y ceros alternativos, de longitud entre 64 bits y 16.384 bits.
- *TDP* (*Topology Dependent Pattern*): secuencia formada por cuatro repeticiones de un patrón de 15 bits de longitud, que depende de la topología de la red.

PHR (PHY *Header*)

La cabecera PHY se transmite usando modulación OOK a la menor velocidad de transmisión correspondiente a la frecuencia de reloj negociada. Algunos de sus campos son opcionales y sólo aparecen cuando está activo el modo de control de luminosidad con modulación OOK:

- *Burst Mode*: indica si la PPDU que se transmite a continuación de la actual es parte de una misma ráfaga.
- *Channel Number*: indica la banda de longitudes de onda usada para la transmisión de la PPDU. Hay 7 valores permitidos, dependiendo de la longitud de onda donde está el pico de energía de la banda usada para la transmisión (desde 380 nm a 780 nm). Este campo también es denominado *Band Plan Id*.
- *MCS-ID*: indica el identificador del MCS-ID empleado para la transmisión de la PPDU.
- *PSDU Length*: longitud en bytes de la carga útil (*PHY Payload*) de la PPDU.
- *Dimmed OOK*: indica si se utiliza el modo de control de la luminosidad cuando se transmite con modulación OOK. Si está activo se añaden campos opcionales al final de la PHR.
- *HCS* (*Header Check Sequence*): campo de verificación CRC-16 (*Cyclic Redundancy Check* de 16 bits) para detectar errores de transmisión en los primeros 32 bits de la cabecera PHR.

Los campos que se indican a continuación son opcionales, dependiendo del modo de funcionamiento PHY usado y de si se usa el control de luminosidad con modulación OOK:

- *HCS Tails bits*: bits de relleno añadidos cuando se transmite en el modo PHY-I con frecuencia de reloj de 200kHz.
- *Dimmed OOK Extension* (*Compensation Length, Resync Length, Subframe Length y OFSC*): campos usados cuando se emplea el control de luminosidad (*dimming*) con modulación OOK. Especifican parámetros como la duración de los símbolos de compensación y sincronización introducidos para el control de la atenuación.
- *Channel Estimation Sequence*: secuencia de 24 bits usada cuando se emplea el modo PHY-III

PHY *Payload*

Campo de longitud variable en el que se encapsula la PSDU (*PHY Service Data Unit*). Contiene la carga útil de la PPDU, que se corresponde con la trama MAC o MPDU (*MAC Protocol Data Unit*). Su tamaño en bytes varía entre 0 y el valor dado por el atributo *aMaxPHYFrameSize* de la capa PHY. Este campo se transmite a la velocidad de transmisión correspondiente al MCS-ID establecido para la comunicación.

Dispone de un campo opcional: *Tail Bits* para añadir seis bits de relleno al final de la PSDU, cuando se transmite empleando el modo PHY-I con velocidades de transmisión de 11,67 Kbps a 48,89 Kbps.

3.5.3 Evaluación de la disponibilidad del canal

La capa PHY puede comprobar el estado del canal de transmisión mediante la función CCA (*Clear Channel Assessment*) para determinar si el canal está libre y disponible para transmitir o por el contrario hay una transmisión en curso. La detección del estado del canal en la función CCA puede realizarse de tres maneras diferentes:

- *CCA Mode 1* (nivel de energía E por encima de un umbral E_{th}): la función CCA devuelve como resultado que el medio está ocupado si se detecta en éste cualquier señal con un nivel de energía E por encima de un umbral E_{th}.

- *CCA Mode-2* (detección de portadora): la función CCA indica que el medio está ocupado si se detecta una señal acorde con las características de las modulaciones empleadas en IEEE 802.15.7. El nivel de energía E de la señal puede estar por encima o por debajo del umbral E_{th}.
- *CCA Mode-3* (detección de portadora con nivel de energía E por encima del umbral E_{th}): el medio se detecta como ocupado si se detecta una señal con las características de las modulaciones de IEEE 802.15.7, y con un nivel de energía E por encima del umbral E_{th}.

En IEEE 802.15.7 no se especifica el tiempo que debe durar la detección del estado del canal cuando se realiza la función CCA, a diferencia de otros estándares como IEEE 802.15.4 [IEEE802.15.4-2006], donde se especifica una duración equivalente a 8 ciclos de reloj.

3.5.4 Control de luminosidad y patrones de inactividad

En los dispositivos IEEE 802.15.7 de tipo infraestructura - como el coordinador de una red con topología en estrella – hay que garantizar que su funcionamiento sea compatible con su uso como fuente de iluminación. Para ello son necesarias diversas funciones que involucran a las capas PHY y MAC, entre las que se encuentra el control de la luminosidad, la minimización del parpadeo, y el uso de patrones de inactividad.

El control de la luminosidad (*dimming*) permite el ajuste de la intensidad de la iluminación de acuerdo a las preferencias del usuario. En el estándar IEEE 802.15.7 existen varios esquemas para el control de la luminosidad dependiendo del tipo de modulación usado [Rajagopal12]. Por ejemplo, si se utiliza la modulación OOK pueden variarse los niveles ON y OFF de cada símbolo para aumentar o disminuir la intensidad luminosa.

De acuerdo al estándar, los dispositivos de tipo infraestructura deben transmitir patrones de inactividad - *idle patterns* - durante los intervalos de tiempo en que están recibiendo datos o no tienen actividad, con el fin de mantener la visibilidad, garantizar el control de la luminosidad y evitar que haya parpadeo visible al ojo humano. Para cumplir con estos requisitos es necesario que el ciclo de trabajo de los patrones de inactividad sea el mismo que el usado en los periodos de tiempo en que se transmiten datos.

Los patrones de inactividad pueden ser insertados entre tramas de datos, tal y como se muestra en el ejemplo de la figura 3.4. El ciclo de trabajo del patrón de inactividad debe de ajustarse para lograr el nivel de brillo deseado en la iluminación y evitar el parpadeo. La selección del tipo de patrón de inactividad no forma parte de la especificación del estándar IEEE 802.15.7.

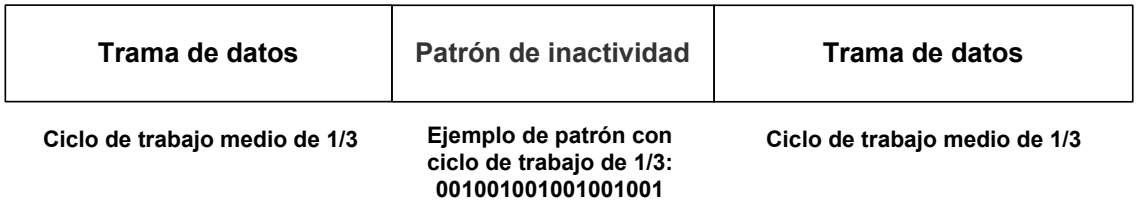


Figura 3.4 – Ejemplo de uso de patrones de inactividad insertados entre tramas.

El estándar permite que los patrones de inactividad puedan ser dentro de banda o fuera de banda, en relación con el espectro de frecuencias de la señal que modula a la portadora óptica, es decir, de acuerdo al espectro de la señal de salida del detector óptico. Los patrones dentro de banda no requieren cambios en la frecuencia de la señal de reloj óptico, y quedan dentro de la banda del espectro correspondiente a la señal moduladora que puede aceptar el receptor. Los patrones fuera de banda mantienen la visibilidad haciendo uso de frecuencias de reloj más bajas (pudiendo incluso usarse corriente continua) y quedan fuera de la banda de paso de la señal que pueden aceptar los circuitos del receptor.

La figura 3.5 muestra un ejemplo del espectro de frecuencias de la señal que modula a la portadora óptica, en el que se pueden distinguir tres regiones [Rajagopal12]:

- **Región de parpadeo**: definida desde el origen de frecuencias hasta los 200 Hz. Las interferencias producidas por las fuentes de luz visible que funcionan a 50 y 60 Hz se encuentran en esta región, en la que también hay que tener en cuenta medidas de seguridad para proteger el ojo humano. Por todo ello, esta región no debe ser usada para la comunicación en VLC.
- **Región dentro de banda**: formada por el rango de frecuencias de la señal moduladora que puede aceptar el receptor. Esta región incluye tanto las señales empleadas para las comunicaciones de datos como los patrones de inactividad dentro de banda.

- **Región fuera de banda**: situada entre la región de parpadeo y la región dentro de banda. Esta región puede ser necesaria para la coexistencia de los distintos modos de funcionamiento de la capa PHY. Por ejemplo, el modo PHY I queda en la región de fuera de banda del modo PHY II, ya que el primero utiliza frecuencias de reloj más bajas que el segundo.

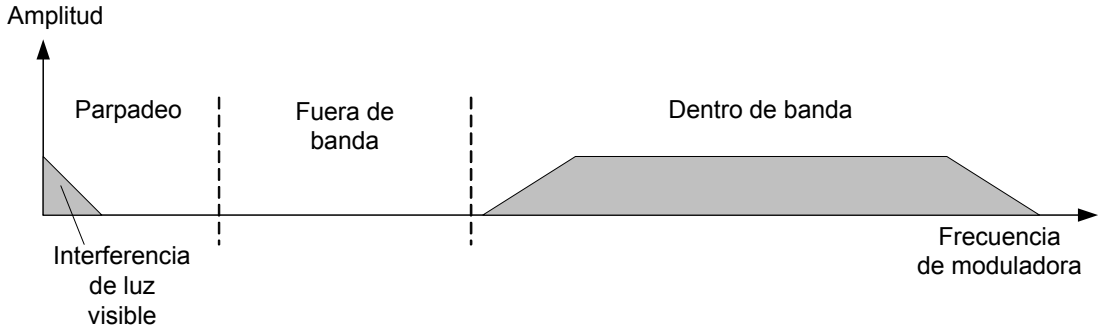


Figura 3.5 – Espectro en el dominio de modulación de la señal en VLC.

3.5.5 Constantes y atributos de la capa PHY

Las características de funcionamiento de la capa PHY están definidas por diversas constantes y atributos almacenados en la base de datos PHY PIB (*PHY Layer Personal Area Network Information Base*) que es gestionada por la entidad PLME (*Physical Layer Management Entity*). En la tabla 3.3 se presentan las constantes de la capa PHY. El valor de estas constantes depende del hardware y no puede ser modificado mientras el dispositivo se encuentra en operación.

La PHY PIB contiene también los atributos necesarios para la gestión de la capa PHY, que pueden ser leídos o modificados - mediante primitivas - mientras el dispositivo está en operación. Existen un total de 6 atributos en la capa PHY, de entre los cuales hay que citar al atributo *phyCurrentChannel*, que indica el número de canal o *Band Plan Id* a emplear en las transmisiones de las PPDU.

Constante	Descripción	Valor
aMaxPHYFrameSize	Máximo tamaño de la PSDU (*PHY Service Data Unit*) que la capa PHY puede recibir	1.023 bytes para PHY I 65.535 bytes para PHY II y PHY III
aTurnaroundTime-TX-RX	Tiempo máximo para el cambio de estado de transmisión a recepción	Cero ciclos de reloj
aTurnaroundTime-RX-TX	Tiempo máximo para el cambio de estado de recepción a transmisión	PHY I: ≤ 240 ciclos de reloj PHY II, III: ≤ 5.120 ciclos de reloj

Tabla 3.3 – Constantes de la capa PHY.

3.6 La capa MAC

La capa MAC del estándar IEEE 802.15.7 es responsable de diversas tareas, entre las que se destacan las siguientes:

- **Control de acceso al medio**: se regula el acceso al medio óptico de transmisión, permitiéndose efectuar transmisiones programadas o realizadas mediante métodos de acceso al medio aleatorios - con contención. Se definen cuatro métodos de acceso aleatorio: acceso aleatorio no ranurado, acceso aleatorio ranurado, CSMA/CA no ranurado y CSMA/CA ranurado.
- **Inicio y mantenimiento de una VPAN**: los dispositivos pueden explorar el canal para comprobar el estado del mismo, detectar la emisión de tramas baliza (*beacons*) emitidas por coordinadores que estén en su rango de cobertura, o localizar una trama baliza en particular para sincronizarse con ella. El resultado de la exploración del canal permite saber qué canales lógicos (*channel number* o *Band Plan Id*) y/o identificadores de VPAN están disponibles, y cuáles están siendo usados por otras redes existentes.
- **Asociación y disociación**: la asociación permite a un dispositivo unirse a una red VPAN existente, y a un coordinador autorizar a un dispositivo para que se una a su VPAN. La disociación finaliza la unión de un dispositivo a una VPAN, y puede ser iniciada tanto por el dispositivo como por el coordinador.
- **Soporte de la función de color**: un dispositivo puede facilitar al usuario información de su estado haciendo que su señal óptica se visualice con un color

determinado. La función de color puede, por ejemplo, servir de ayuda para que el usuario alinee adecuadamente el dispositivo para una correcta comunicación.

- **Soporte para la iluminación y el control de la luminosidad**: incluyendo el uso de preámbulos extendidos para mejorar la sincronización, y el ajuste de la planificación de las transmisiones para adecuarse a un determinado nivel de brillo fijado para la iluminación.
- **Movilidad**: en el caso de que se utilicen infraestructuras que incluyan múltiples transmisores/receptores ópticos para soportar la comunicación mediante celdas.
- **Otras funciones adicionales**: como el soporte para la seguridad de las comunicaciones, o la capacidad para proporcionar un enlace fiable para la comunicación mediante tramas de confirmación.

De entre las funciones y características de la capa MAC del estándar IEEE 802.15.7 se detallan a continuación sólo aquellas relacionadas directamente con los objetivos del trabajo realizado en esta tesis.

3.6.1 Estructura de la supertrama

La capa MAC permite el uso opcional de una estructura temporal denominada supertrama, cuyas características vienen definidas por el coordinador. La supertrama es un patrón temporal que viene delimitado por tramas baliza (*beacons*). El coordinador transmite las tramas baliza al principio de cada supertrama para sincronizar los dispositivos, identificar la VPAN y definir las características de la supertrama.

La supertrama puede tener una parte activa y una inactiva. La parte activa está dividida en 16 intervalos de tiempo o *slots* equiespaciados, durante los cuales se realizan todas las comunicaciones. La parte inactiva permite que los dispositivos pasen al estado de ahorro de energía.

La parte activa se divide en un periodo de acceso con contención o CAP (*Contention Access Period*), en el que los dispositivos compiten entre sí para acceder al canal empleando un procedimiento de acceso aleatorio, y un periodo de acceso sin contención o CFP (*Contention Free Period*), destinado a aplicaciones con requisitos de latencia y ancho de banda. En el CFP el acceso al medio se realiza de forma

centralizada mediante el uso de *slots* denominados GTS (*Guaranteed Time Slot*), los cuales son asignados por el coordinador.

La estructura de la supertrama viene definida por varios parámetros y atributos de configuración de la MAC PIB (*MAC Layer Personal Area Network Information Base*) que se describen a continuación:

- El atributo *macBeaconOrder*, *BO*, define el intervalo usado por el coordinador para transmitir sus tramas baliza. Los atributos *BO* y *aBaseSuperframeDuration* definen la duración - en ciclos de reloj - del intervalo de tiempo entre tramas baliza, *BI* (*beacon interval*), de acuerdo a la siguiente expresión:

$$BI = aBaseSuperframeDuration \times 2^{BO};\ \text{para: } 0 \leq BO \leq 14 \qquad (2.1)$$

Si $BO = 15$ el coordinador no transmite tramas baliza.

Donde *aBaseSuperframeDuration* se define como el número de ciclos de reloj que forman la supertrama cuando el atributo *macSuperframeOrder* (véase a continuación) es igual a 0.

- El atributo *macSuperframeOrder*, *SO*, define la longitud de la parte activa de la supertrama, incluyendo la trama baliza. La relación entre el valor de *SO* y la duración de la parte activa de la supertrama, *SD* (*superframe duration*), medida en ciclos de reloj viene dada por:

$$SD = aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO};\ \text{para: } 0 \leq SO \leq BO \leq 14 \qquad (2.2)$$

Si $SO = 15$ la trama no tendrá parte activa.

La trama baliza se transmite al comienzo del primer slot de la supertrama sin hacer uso de ningún método de acceso aleatorio. El CAP comienza inmediatamente después de la trama baliza, y el CFP - si existe - comienza a continuación del CAP, extendiéndose hasta el final de la parte activa de la supertrama.

En la figura 3.6 se ilustra un ejemplo de configuración de supertrama, en la que el intervalo de baliza *BI* tiene el doble de duración que la parte activa de la supertrama *SD*, y el CFP contiene dos GTS.

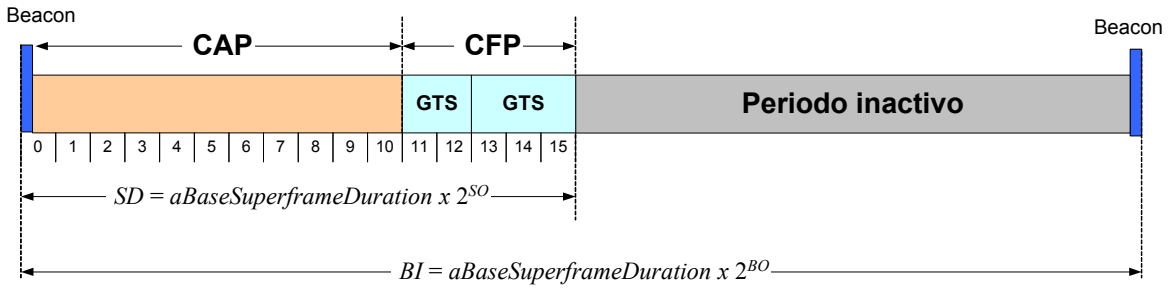


Figura 3.6 – Ejemplo de estructura de supertrama.

3.6.2 Acceso aleatorio al canal

Cuando se utiliza la supertrama en una VPAN, para transmitir en el CAP la capa MAC utiliza la versión ranurada del algoritmo de acceso aleatorio definido en el estándar. Si no se usan tramas baliza no hay supertrama definida y se emplea la versión no ranurada del algoritmo. En ambos casos el algoritmo de acceso se implementa mediante unidades de tiempo denominadas periodos de *backoff* (cuenta atrás), siendo la duración de un periodo de backoff igual al parámetro *aUnitBackoffPeriod*, expresado en ciclos de reloj:

$$aUnitBackoffPeriod = 20 \text{ ciclos de reloj} \tag{2.3}$$

Cuando se utiliza el acceso aleatorio ranurado, los periodos de backoff de los dispositivos de la VPAN deben estar alineados con los slots de la supertrama, de forma que el comienzo del primer periodo de backoff de cada dispositivo debe coincidir con el comienzo de la transmisión de la trama baliza.

En la figura 3.7 se muestra el diagrama de flujo de la versión ranurada del algoritmo de acceso aleatorio empleado en IEEE 802.15.7, que es descrito a continuación.

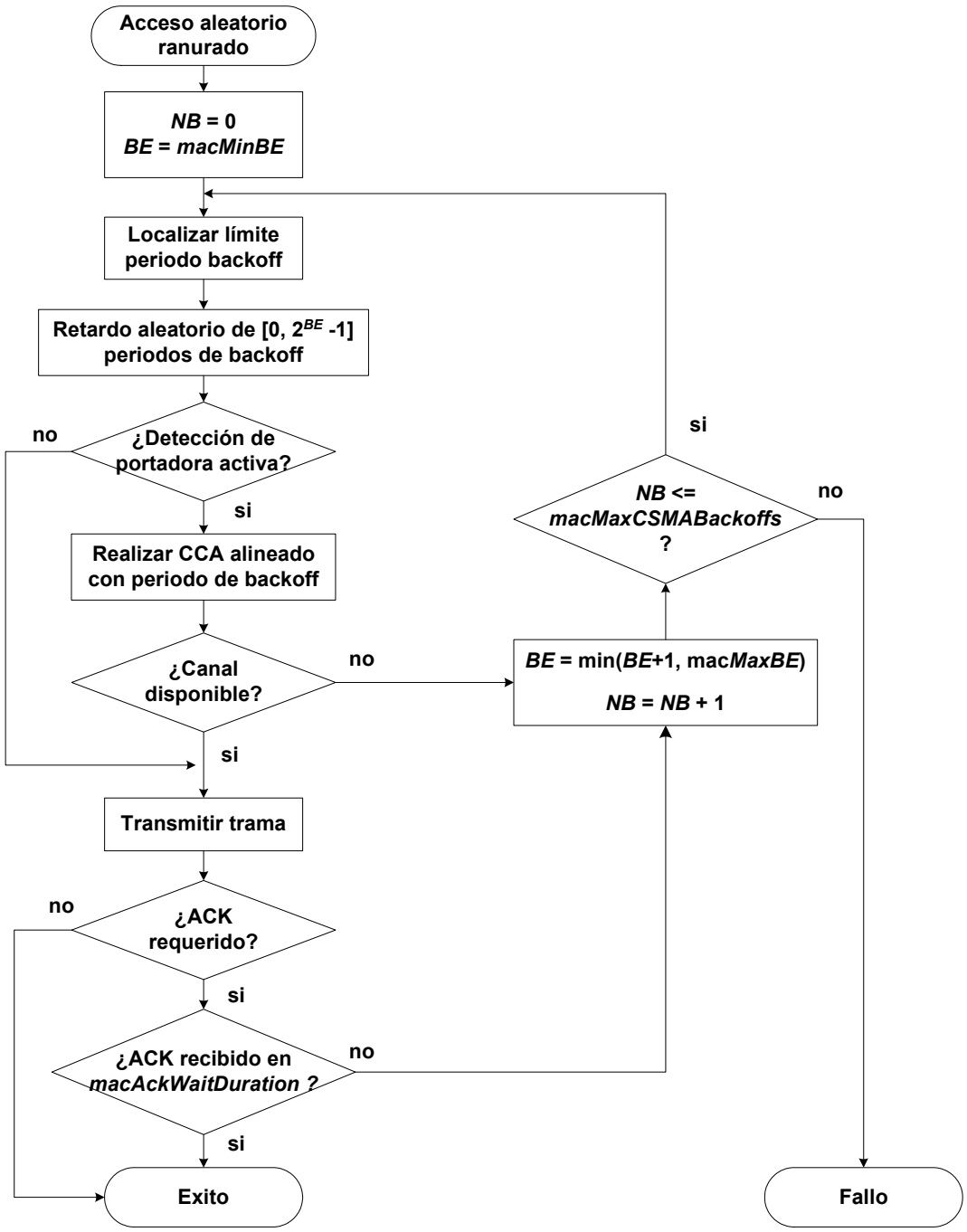


Figura 3.7 –Versión ranurada del algoritmo de acceso aleatorio.

Durante cada intento de transmisión de una trama realizado mediante el algoritmo de acceso aleatorio, cada dispositivo mantiene dos variables:

- *NB* (*Number of Backoffs*): variable que contabiliza el número de veces que el algoritmo de acceso al medio ha realizado un backoff – un retardo aleatorio mediante una cuenta atrás – durante el actual intento de transmisión de la trama.

Esta variable se inicializa a cero al comenzar el procedimiento de transmisión de una trama.

- *BE* (*Backoff Exponent*): variable que guarda relación con el número de periodos de backoff que esperará el dispositivo antes de comprobar el estado del canal o acceder al mismo para transmitir. Esta variable se inicializa al valor de atributo *macMinBE*.

El procedimiento de acceso comienza con la inicialización de las variables *NB* y *BE*. A continuación, por usarse el acceso aleatorio ranurado, es necesario alinear el comienzo de los periodos de backoff del dispositivo con el comienzo de la supertrama.

Seguidamente se realiza el retardo de un número entero de periodos de backoff escogido aleatoriamente en el rango $[0, 2^{BE} - 1]$. Si el número de periodos de backoff del retardo es mayor que el número de periodos de backoff que restan en el CAP de la supertrama, la capa MAC interrumpe la cuenta atrás al final del CAP y continúa al comienzo del CAP de la siguiente supertrama.

Una vez finalizado el backoff, la capa MAC continuará el procedimiento de acceso si el resto de los pasos del algoritmo, incluyendo la transmisión de la trama - y en su caso la correspondiente confirmación - pueden realizarse antes de que termine el CAP. En caso contrario, esperará al comienzo del CAP de la siguiente supertrama y realizará un nuevo retardo de backoff.

En el caso de que la capa MAC pueda continuar el procedimiento, y si está habilitada la opción CCA (*Clear Channel Assessment*), se solicita a la capa PHY que realice la función CCA para comprobar si el canal está disponible o hay transmisiones en curso.

Si la capa PHY evalúa que el canal está ocupado, la capa MAC incrementará las variables *NB* y *BE*, asegurándose de que *BE* no sea mayor que *macMaxBE*. Si *NB* es menor o igual al valor del atributo *macMaxCSMABackoffs*, se comenzará un nuevo retardo de backoff. Si el valor de *NB* es mayor que *macMaxCSMABackoffs*, el algoritmo terminará con un fallo de acceso al canal, al haberse sobrepasado el máximo número de backoffs permitidos para intentar transmitir la trama.

Si la capa PHY evalúa que el canal está disponible - o si la opción CCA no está activa - se realizará la transmisión de la trama. En la versión ranurada del algoritmo de

acceso aleatorio tanto la operación de CCA como la transmisión de la trama deben estar alineadas con el comienzo de un slot de backoff.

Después de transmitir la trama, si está habilitado el uso de tramas de confirmación o ACK (*Acknowledgement*), se esperará por la trama ACK procedente del receptor hasta un tiempo máximo, dado por el atributo *macAckWaitDuration*. En el caso de recibirse la trama ACK se dará por concluido el procedimiento con éxito.

En el caso de no recibirse la trama ACK se procederá a incrementar las variables *NB* y *BE* para realizar un nuevo backoff siempre que *NB* no sea mayor que *macMaxCSMABackoff*.

La versión ranurada del algoritmo de acceso al medio empleado en IEEE 802.15.7 es muy similar a la empleada en el estándar IEEE 802.15.4, aunque hay que destacar algunas diferencias importantes:

- En IEEE 802.15.7 se invoca una sola vez la función CCA para comprobar si el canal está disponible antes de transmitir. En IEEE 802.15.4, cuando se emplea el mecanismo de acceso ranurado, se comprueba la disponibilidad del canal invocando la función CCA dos veces.
- En IEEE 802.15.7 tanto la detección del canal ocupado como la no recepción de la trama de confirmación (ACK) hacen que se realice un nuevo retardo de backoff (si no se superan los límites máximos) incrementándose las variables *NB* y *BE*. En IEEE 802.15.4 la retransmisión de una trama por no recibirse su confirmación supone un nuevo comienzo del procedimiento de acceso, con la inicialización de las variables *NB* y *BE*.

3.6.3 Formato general y tipos de tramas MAC

El formato general de las tramas MAC incluye los siguientes campos:

- Una cabecera MHR (*MAC Header*): que incluye un campo de control, el número de secuencia, los campos de direccionamiento, e información relacionada con los mecanismos de seguridad del MAC.
- Un campo de datos MSDU (*MAC Service Data Unit*): que contiene la carga útil (*payload*) de la trama, presente en aquellos tipos de trama que lo

requieran. Cuando existe, contiene información que depende del tipo de trama y es de longitud variable.

- Un campo de finalización MFR (*MAC Footer*): que existe cuando la trama incluye un campo de MSDU. Contiene una secuencia de verificación de trama de tipo CRC.

Los campos de la cabecera MHR aparecen en un orden fijo, aunque algunos de ellos, como los campos de direccionamiento, no aparecen en todos los tipos de tramas. En la figura 3.8 se muestra el formato general de las tramas MAC.

<table>
<tr><th colspan="7">MHR</th><th>MSDU</th><th>MFR</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Frame Control
(2 bytes)</td><td rowspan="2">Seq Number
(1 byte)</td><td colspan="4">Addressing Fields</td><td rowspan="2">Aux Security Header
(0/5/6/10/ 14)</td><td rowspan="2">Payload
(variable)</td><td rowspan="2">FCS</td></tr>
<tr><td>Dest VPAN Id
(0/2 byte)</td><td>Dest Address
(0/2/8 bytes)</td><td>Src VPAN Id
(0/2 byte)</td><td>Src Address
(0/2/8 bytes)</td></tr>
</table>

Figura 3.8 – Formato general de las tramas MAC.

El estándar define cinco tipos de tramas MAC:

- *Tramas baliza* (*beacon*): enviadas por el coordinador de la red. Sirven para sincronizar los dispositivos e identificar la VPAN, así como para delimitar y definir las características de la supertrama.
- *Tramas de datos*: contienen los datos de la capa superior que deben ser transmitidos por la capa MAC.
- *Tramas de confirmación o reconocimiento* (ACK): confirman la correcta recepción de una trama de datos.
- *Tramas de órdenes*: mediante las que realizan diversas funciones de gestión y control de la capa MAC. Algunos ejemplos de tipos de tramas de órdenes son: solicitud y respuesta de asociación/disociación, solicitud y respuesta de petición de slot GTS, notificación de cambio de frecuencia de reloj, notificación de conflicto de identificador de VPAN, etc.
- *Tramas CVD* (*Color Visibility and Dimming frame*): se utilizan para enviar - en su carga útil - patrones de visibilidad, que son patrones de inactividad dentro de

banda. Este tipo de tramas se emplea para notificar al usuario dándole información visual del estado o la calidad de la comunicación (por ejemplo, para avisar de un mal alineamiento entre dispositivos).

El algoritmo de acceso aleatorio al canal de la capa MAC no se emplea para la transmisión de todos los tipos de tramas descritos. Por ejemplo, no se emplea para la transmisión de tramas baliza, para las tramas de confirmación (ACK), ni para las tramas de datos enviadas durante el período sin contención de la supertrama (CFP).

3.6.4 Constantes y atributos de la capa MAC

La entidad MLME (*MAC Sublayer Management Entity*) es la responsable de mantener la base de datos MAC PIB, que contiene las constantes y atributos gestionados por la capa MAC. En la tabla 3.4 se presentan las constantes de la capa MAC que tienen más relevancia en cuanto al funcionamiento del modelo de simulación implementado para esta tesis.

Constante	Descripción	Valor
aBaseSlotDuration	Número de ciclos de reloj que forman un slot de la supertrama cuando *macSuperframeOrder* = 0	60
aBaseSuperframeDuration	Número de ciclos de reloj que forman la supertrama cuando *macSuperframeOrder* = 0	*aBaseSlotDuration* x *aNumSuperframeSlots*
aNumSuperframeSlots	Número de slots contenidos en la supertrama	16
aUnitBackoffPeriod	Número de ciclos de reloj que forman el periodo de backoff usado en el algoritmo de acceso aleatorio	20

Tabla 3.4 – Principales constantes de la capa MAC.

La MAC PIB contiene también los atributos necesarios para gestionar el funcionamiento de la capa MAC, incluyendo los atributos *macBeaconOrder* (*BO*) y *macSuperframeOrder* (*SO*), descritos en el apartado 3.6.1. En la tabla 3.5 se muestran los restantes atributos de la capa MAC que tienen especial importancia en el funcionamiento del modelo de simulación implementado para esta tesis.

Atributo	Descripción	Rango de Valores	Valor por defecto
macAckWaitDuration	Máximo numero de ciclos de reloj a esperar por una trama ACK después de haber transmitido una trama de datos	Su valor se obtiene como la suma del tiempo necesario para comenzar la transmisión de la trama ACK y la duración de la misma	Depende del modo de trabajo del PHY seleccionado
macMaxBE	Valor máximo de la variable *BE* (*Backoff Exponent*) usada en el algoritmo de acceso aleatorio	3 - 15	5
macMinBE	Valor mínimo de la variable *BE* (*Backoff Exponent*) usada en el algoritmo de acceso aleatorio	0 - *macMaxBE*	3
macMaxCSMABackoffs	Máximo número de retardos de backoff a realizar en el algoritmo de acceso aleatorio antes de declarar un fallo de acceso al canal	0 - 5	4
macMaxFrameRetries	Máximo número de reintentos de transmisión de una trama antes de declarar un fallo de transmisión de trama	0 - 7	3

Tabla 3.5 – Principales atributos de la capa MAC.

4. Modelo de simulación

En este capítulo se introduce, en primer lugar, la plataforma de simulación utilizada para implementar el modelo elaborado para este trabajo de investigación. A continuación se presenta una descripción funcional del modelo realizado. Seguidamente, se reseñan los trabajos publicados hasta la fecha donde se evalúan y analizan las prestaciones de las comunicaciones *uplink* realizadas durante el CAP de la supertrama, según el estándar IEEE 802.15.7. Se finaliza detallando algunas características especialmente importantes del modelo de simulación implementado.

4.1 Plataforma de simulación Omnet++

OMNeT++ (*Objective Modular Network Testbed*) [omnetpp15] es una plataforma de simulación extensible, modular y basada en componentes, que permite el modelado y la simulación de redes de telecomunicaciones, protocolos, sistemas distribuidos y en general, cualquier sistema que pueda simularse mediante eventos discretos. OMNeT++ esta disponible para sistemas operativos basados en UNIX y Windows, distribuyéndose bajo Licencia Pública Académica.

OMNeT++ proporciona los recursos básicos para realizar simulaciones, pero por sí mismo no da soporte a la simulación de ningún tipo específico de red, tecnología o arquitectura de protocolos. La funcionalidad necesaria para la simulación de redes y protocolos específicos es aportada por modelos elaborados por la comunidad de

desarrolladores. Muchos de estos modelos se presentan agrupados en paquetes de simulación, entre los que se pueden destacar a INET [inet15], INETMANET [inetmanet15] y Mixim [mixim13].

OMNeT++ provee una arquitectura jerárquica y modular para implementar los modelos de simulación. En el nivel más bajo de la jerarquía están los llamados módulos simples, que contienen los algoritmos con los que se implementa el comportamiento activo del modelo. Los módulos simples se programan en C++, haciendo uso de la biblioteca de clases de simulación aportada por el *kernel* de OMNeT++.

Los módulos simples se pueden ensamblar en componentes mediante un lenguaje de alto nivel llamado NED (*Network Description*) dando lugar a módulos compuestos. Al módulo compuesto de más alto nivel en un modelo se le denomina como módulo de sistema, o simplemente red.

4.2 Descripción funcional del modelo de simulación

A continuación se presenta de forma resumida la descripción funcional de los principales componentes que forman parte del modelo de simulación implementado.

4.2.1 La red

El modelo implementado para esta tesis permite la simulación de una red VLC con topología en estrella de acuerdo al estándar IEEE 802.15.7. La red modelada se compone de varios dispositivos y un coordinador, todos ellos contenidos en un recinto tridimensional cerrado. El coordinador, que es fijo y forma parte de la infraestructura de iluminación, está ubicado en el centro del techo del recinto y está orientado apuntando hacia el suelo. La figura 4.1 ilustra un ejemplo de modelo de red en estrella compuesta por 4 dispositivos y un coordinador.

Para la implementación del modelo de simulación se ha tomado como punto de partida el modelo realizado por [Chen08] para redes de sensores basadas en el estándar IEEE 802.15.4. Dicho modelo, que está disponible en el paquete de simulación INETMANET para OMNeT++, fue seleccionado debido a las similitudes que existen entre las arquitecturas de los estándares IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.7.

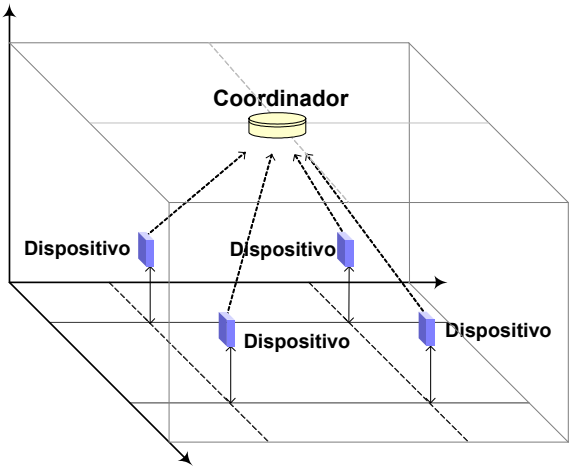


Figura 4.1 – Modelo de red con topología en estrella.

4.2.2 El medio óptico

Este módulo de la red es el encargado de modelar el medio de transmisión óptico y su comportamiento. Las principales funciones que realiza son:

- Realizar el seguimiento de los nodos de la red (dispositivos y coordinador), supervisando su posición, orientación, el estado de su transceptor, y los vecinos que se encuentran dentro de su rango de cobertura.
- Modelar la propagación de las señales ópticas en el medio de transmisión. Entregar las tramas a los nodos de la red que están en el rango de cobertura de cada nodo transmisor, aplicando a las tramas recibidas el retardo de propagación que corresponde según la distancia recorrida.
- Gestionar los *Band Plan Id* o números de canal lógico usados para transmitir las tramas, de acuerdo a los rangos de longitudes de onda utilizables según el estándar IEEE 802.15.7.

4.2.3 El nodo

Cada nodo de la red está constituido por varios módulos, que modelan la funcionalidad de las capas de una arquitectura simplificada basada en el estándar IEEE 802.15.7. Adicionalmente, se incluyen dos módulos que modelan dos características fundamentales en el funcionamiento de los dispositivos móviles: un módulo de gestión

de la batería y otro módulo para gestionar la movilidad. La figura 4.2 ilustra una representación de los módulos componentes de cada nodo de la red, cuyas principales características serán descritas a continuación.

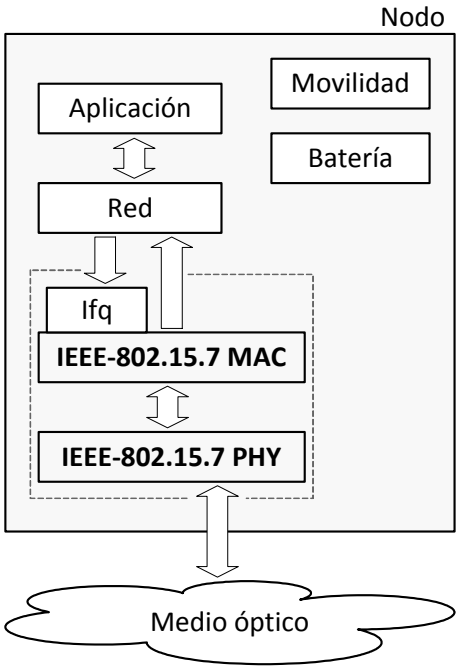


Figura 4.2 – Módulos componentes de cada nodo de la red.

Los módulos que componen la estructura de cada nodo son:

- **IEEE-802.15.7 PHY**: modela las principales características de la capa PHY. De entre las funciones implementadas en este módulo se pueden a destacar las siguientes:
    - Transmisión y recepción de las PPDU (*Physical Layer Data Unit*) a través del medio óptico.
    - Cálculo de la potencia óptica con que se recibe cada trama de acuerdo a la configuración de enlace LOS directivo.
    - Cálculo de la relación señal a interferencia más ruido (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio*) de cada trama.
    - Selección del identificador de modo de operación, o MCS-ID, que determina la velocidad de transmisión y la frecuencia de reloj a utilizar en la comunicación.

- Modelado del transceptor óptico incluyendo sus parámetros característicos, como las velocidades de transmisión y recepción, y las frecuencias de reloj soportadas.
- Control de los estados de la capa PHY y del transceptor óptico.
- Implementación de la función CCA para comprobar si el canal de transmisión está disponible para transmitir.
- Cálculo del indicador de calidad del canal óptico WQI de las tramas recibidas.
- Selección del número de canal óptico para la transmisión de las tramas.
- Gestión de las constantes, atributos y otros parámetros de operación de la capa PHY.
- Implementación de las primitivas de servicio.

- **IEEE-802.15.7 MAC**: modela la funcionalidad básica de la capa MAC. De entre las funciones implementadas en este módulo se destacan las siguientes:
  - Procedimientos de control de acceso al medio óptico con contención (CAP) y sin contención (CFP).
  - Transmisión de las tramas baliza desde el coordinador, para delimitar y definir la estructura de la supertrama.
  - Recepción de las tramas baliza en los dispositivos, y sincronización de éstos con la supertrama.
  - Mecanismo opcional para garantizar transmisiones fiables mediante el uso de tramas de confirmación (ACK).
  - Asignación y gestión simplificada de slots GTS para la transmisión en el CFP.
  - Retardo IFS (*Interframe Space*) para separación de tramas sucesivas transmitidas desde un dispositivo.
  - Filtrado y detección de tramas duplicadas en recepción.
  - Proceso simplificado de asociación de los dispositivos con el coordinador.
  - Gestión de los estados de la capa PHY.

- **Ifq (*Interface Queue*)**: implementa un cola de tipo FIFO (*First In First Out*) de tamaño configurable, para almacenar temporalmente los paquetes de la capa de red a ser transmitidos por la capa MAC.
- **Red**: realiza las funciones de una capa de red básica, encaminando los paquetes dentro de la red VLC en estrella. No incluye funciones de interconexión de redes.
- **Aplicación**: modela una capa de aplicación de funcionalidad básica, que puede actuar como fuente de tráfico generando paquetes, y como sumidero recibiendo y analizando los paquetes que recibe.
- **Movilidad**: determina la posición y orientación de cada nodo de la red en cada instante de la simulación. Los dispositivos móviles pueden configurarse para seguir diferentes patrones de movimiento (lineal, circular, aleatorio, etc.).
- **Batería**: modela el estado de la batería en los dispositivos móviles, que se actualiza a partir de los datos de consumo de energía proporcionados por la capa PHY. El consumo se modela dependiendo de los estados del transceptor óptico.

4.2.4 Estructura jerárquica de módulos

La estructura de módulos que componen el modelo de simulación se organiza en tres niveles básicos de jerarquía, que se corresponden con los tres módulos principales que componen dicho modelo:

- ***Ieee802157StarNet***: módulo de red o de sistema, que modela el conjunto de la red VLC con topología en estrella.
- ***Ieee802157Node***: módulo compuesto con el que se modela cada uno de los nodos de la red, tanto los dispositivos móviles como el coordinador.
- ***Ieee802157Nic***: modulo compuesto que modela la interfaz de red de cada nodo, incluyendo las funciones de las capas PHY y MAC.

A modo de ejemplo, en la figura 4.3 se ilustra una representación, en el entorno gráfico de simulación de OMNeT++, de los tres niveles de jerarquía citados. La red mostrada consta de cuatro dispositivos y un coordinador.

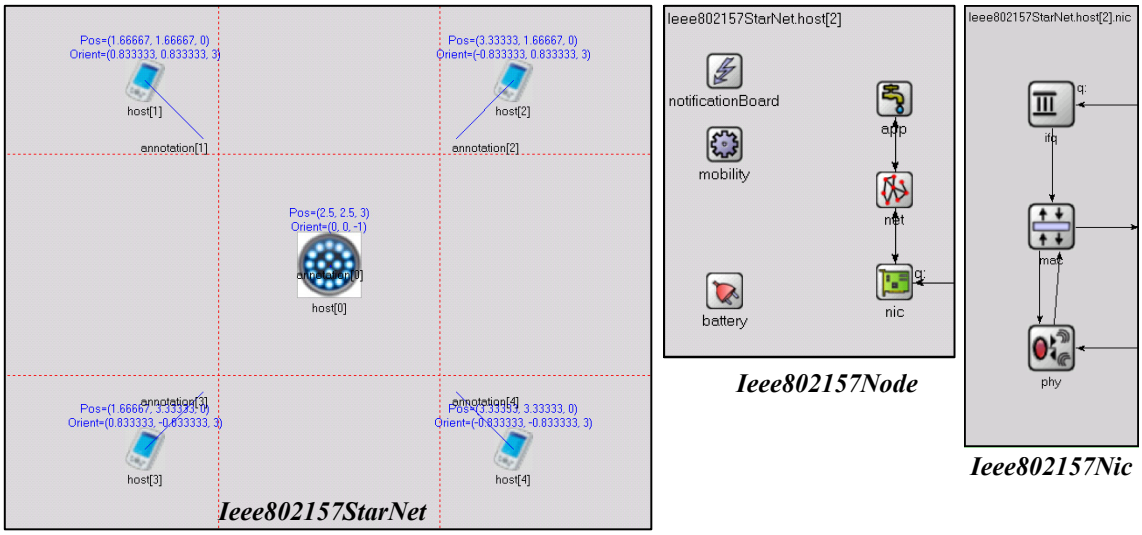


Figura 4.3 – Jerarquía de módulos del modelo de simulación

4.3 Trabajos previos de evaluación de prestaciones del estándar IEEE 802.15.7

Como se ha indicado en el apartado 3.6.1, la capa MAC permite el uso de una estructura denominada supertrama que sirve como marco temporal de referencia para todos los nodos de la red. La parte activa de la supertrama - durante la que se realizan las comunicaciones entre los nodos - incluye el periodo de acceso con contención o CAP (*Contention Access Period*). Durante este periodo, los dispositivos compiten entre sí para acceder al canal empleando la versión ranurada del algoritmo de acceso aleatorio que se ha descrito en el apartado 3.6.2.

El análisis y la evaluación de prestaciones de las técnicas de control de acceso al medio es una línea de investigación abierta desde hace años, con múltiples publicaciones y aportaciones realizadas. En las redes inalámbricas destaca como uno de los trabajos seminales el realizado por G. Bianchi para el análisis del estándar IEEE 802.11, publicado en [Bianchi98] y [Bianchi00]. El método de análisis de Bainchi se basa en el uso de cadenas de Markov en tiempo discreto para modelar el comportamiento de los nodos de la red, asumiendo que en ésta no existen nodos ocultos. En el modelo de Bianchi se considera que la red se encuentra en condición de tráfico saturado (*saturated traffic*), lo que equivale a decir que en cada uno de sus nodos siempre hay una trama lista para ser transmitida.

Con posterioridad a los estudios publicados por Bianchi, otros investigadores han publicado trabajos - basados tanto en métodos analíticos como de simulación - para analizar el rendimiento de los métodos de control de acceso al medio empleados en la capa MAC, aplicándolos a distintos escenarios y estándares de redes inalámbricas.

En lo referente al estándar IEEE 802.15.7 destacan varios trabajos publicados que evalúan el rendimiento del método CSMA/CA ranurado, empleado para las transmisiones *uplink* (de los dispositivos al coordinador) durante el CAP de la supertrama. A continuación se reseñan los trabajos más representativos conocidos hasta la fecha.

En [Hwang13] se analiza el rendimiento de las transmisiones uplink en el CAP, empleando un modelo de simulación para evaluar el *throughput* y el retardo medio de las tramas. Aunque los autores no especifican el modelo de canal físico empleado, ni indican si consideran o no la existencia de nodos ocultos en la red, los resultados de sus simulaciones no permiten demostrar que se haya considerado los efectos del problema del nodo oculto en el rendimiento de las transmisiones.

En [Musa13] se propone un modelo de evaluación analítico basado en cadenas de Markov de tiempo discreto, con el que obtienen resultados para el *throughput* y el número de tramas perdidas, resultados que son contrastados mediante simulaciones realizadas con ns-2 [isi14]. Sin embargo, su modelo asume que no se retransmiten tramas cuando no se reciben confirmaciones (ACK) y descarta la existencia de nodos ocultos en la red.

En [Nobar15] se realiza un análisis exhaustivo del rendimiento del método CSMA/CA con tráfico saturado, mediante un modelo basado en cadenas de Markov que refinan mediante técnicas semianalíticas. Los autores evalúan múltiples parámetros de rendimiento de la red, como el *throughput*, las probabilidades de transmisión y colisión de tramas, el retardo y el consumo de energía. Realizan también una verificación de sus resultados mediante simulaciones efectuadas con MATLAB [mathworks15]. Sin embargo, en su modelo descartan explícitamente la existencia de nodos ocultos en la red.

Por último, en [Shams15] se realiza también un análisis basado en cadenas de Markov, obteniendo resultados para varias métricas de rendimiento de la red como el

troughput, el retardo, o la probabilidad de colisión. Pero de igual forma a los trabajos antes citados, en éste se descarta la existencia de nodos ocultos en la red.

Los trabajos reseñados anteriormente tienen como denominador común el hecho de no considerar las características de propagación de la señal en el medio óptico, ni la directividad propia de los transmisores y receptores ópticos. En consecuencia, no pueden tener en cuenta los efectos del problema del nodo oculto en sus resultados.

En conclusión, en base a los trabajos publicados y conocidos por el autor de esta tesis, hasta la fecha no existen estudios que evalúen el impacto de la presencia de nodos ocultos sobre el rendimiento del método CSMA/CA empleado en las transmisiones *uplink* realizadas durante el CAP de la supertrama, según el estándar IEEE 802.15.7.

4.4 Características de los escenarios de simulación

El modelo de simulación desarrollado para realizar los trabajos de esta tesis se ha diseñado teniendo en cuenta las siguientes premisas:

- De entre las topologías definidas en el estándar IEEE 802.15.7 se ha elegido la topología en estrella por considerarse la más versátil en cuanto a posibles aplicaciones de uso, en comparación con las topologías *peer-to-peer* y difusión.
- En cuanto a la capa MAC, se ha optado por incluir el uso de la supertrama, ya que ésta permite emplear tanto el acceso al medio con contención (CAP) como el acceso sin contención (CFP). Además, el uso de la supertrama posibilita que los dispositivos ahorren energía durante el periodo inactivo de la misma.

Partiendo de las premisas indicadas, el modelo de simulación ha sido diseñado con el objetivo de evaluar el rendimiento de las transmisiones uplink durante el CAP de la supertrama en una red con topología en estrella. Para ello se han definido cuatro escenarios básicos que difieren en el número de dispositivos que se comunican con el coordinador - teniéndose 4, 8, 12 y 16 dispositivos respectivamente.

En todos los escenarios, los nodos de la red simulada están contenidos en un recinto cerrado, de 4 m de altura por 5 m de ancho y 5 m de largo. El coordinador se encuentra situado en el centro del techo del recinto, y está orientado apuntando hacia el suelo. Los dispositivos se ubican en posiciones fijas sobre un plano situado a una altura de 1 m sobre el suelo, distribuidos uniformemente según un patrón de rejilla cuadriculada. Los dispositivos están orientados apuntando al coordinador.

En la figura 4.4 se ilustra la disposición de los nodos de la red simulada en el escenario con 4 dispositivos.

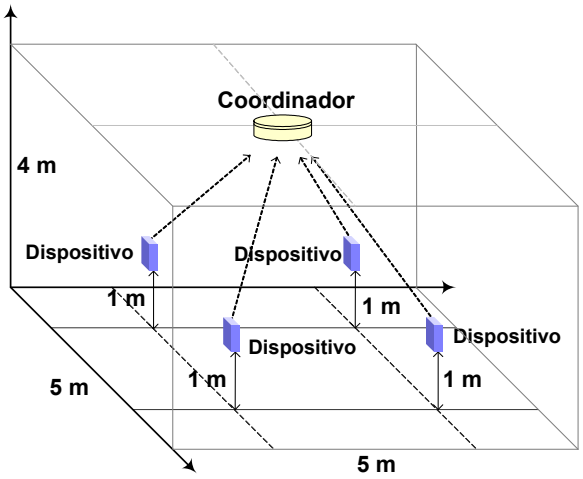


Figura 4.4 – Escenario de red en estrella con cuatro dispositivos.

A continuación se describen aquellas características específicas del modelo de simulación cuyo conocimiento es necesario para interpretar adecuadamente los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas.

4.4.1 Modelo de canal óptico

En el modelo implementado, la transmisión entre los nodos de la red se realiza a través del espacio libre y sin presencia de obstáculos. Para modelar la propagación de las señales ópticas en el medio se ha elegido la configuración de enlace LOS, que precisa de una línea de visión entre cada dispositivo y el coordinador.

En el cálculo de la potencia de la señal óptica recibida se ha considerado la contribución de la componente directa de la señal, no contemplándose la existencia de reflexiones en la misma (véase el apartado 2.3.3). De acuerdo a los resultados presentados en [Komine04], con un campo de visión (FOV) de 60º en el receptor, la componente de luz directa en VLC supone al menos el 90% de la potencia óptica total recibida. Por ello, para garantizar la validez del modelo implementado se han configurado los receptores ópticos con el valor de 60º para el campo de visión.

El modelo de canal óptico adoptado tiene la ventaja de facilitar que se alcancen altas velocidades de transmisión, al no considerarse los efectos de la distorsión por

multipropagación sobre la señal óptica. Entre sus inconvenientes se encuentra la limitación en la movilidad de los dispositivos, al requerirse que éstos deban estar permanentemente orientados apuntando al coordinador. Para satisfacer este requerimiento, en el modelo de simulación se ha dotado a los dispositivos de la capacidad de orientarse automáticamente apuntando al coordinador.

El cálculo de la potencia recibida considerando la componente directa de la señal presenta la ventaja adicional de mejorar la eficiencia de ejecución del modelo de simulación implementado. Se reduce significativamente la carga computacional necesaria para ejecutar simulaciones de escenarios con múltiples nodos, en los que se modela la funcionalidad de las diversas capas de la arquitectura.

El modelo de canal utilizado (LOS directivo) ha sido empleado en múltiples trabajos publicados, elaborados con el fin de analizar diferentes aspectos del funcionamiento de sistemas VLC mediante simulaciones. Ejemplos de dichos trabajos son los realizados por [Hou15], [Deqiang07], [Mondal12], [Nguyen13] y [Wang15].

En el modelo de canal empleado se ha simplificado también el cálculo de la ganancia del concentrador óptico $G(\psi)$ y del coeficiente de transmisión $T(\psi)$ del filtro óptico del receptor - véase la expresión (2.7). Se ha considerado que ambos son constantes y no dependen del ángulo ψ con el que la señal óptica incide sobre receptor.

4.4.2 Procedimiento de acceso al medio de transmisión

El procedimiento de acceso al medio de transmisión usado en el modelo de simulación se basa en el algoritmo de acceso aleatorio CSMA/CA ranurado definido en el estándar y descrito en el apartado 3.6.2. Este procedimiento es utilizado para las transmisiones uplink realizadas durante el CAP de la supertrama, que son denominadas *transmisiones directas* en el estándar.

Al algoritmo implementado en el modelo de simulación se le han añadido los pasos necesarios para verificar que no se sobrepase el número máximo de retransmisiones de tramas, de acuerdo a la cláusula 5.1.7.5 del estándar [IEEE802.15.7-2011]. En dicha cláusula se especifica que, una vez transmitida la trama, si no se recibe la correspondiente confirmación (ACK) se considera fallida la transmisión y la trama debe ser retransmitida, pudiendo repetirse esta secuencia hasta un máximo de *macMaxFrameRetries* veces. De esta forma, si la transmisión de una trama falla un total

de (1 + *macMaxFrameRetries*) veces, la capa MAC terminará el procedimiento con un fallo de transmisión de trama. Para cumplir con este requerimiento, se ha añadido al algoritmo de acceso aleatorio una variable, *numRetries*, que contabiliza el número de retransmisiones de cada trama, así como los pasos necesarios para verificar que no se realicen más de *macMaxFrameRetries* retransmisiones de cada trama.

En la figura 4.5 se ilustra el organigrama del algoritmo de acceso aleatorio implementado en el modelo de simulación, en el que se han diferenciado en color azul los elementos añadidos para el control del número máximo de retransmisiones.

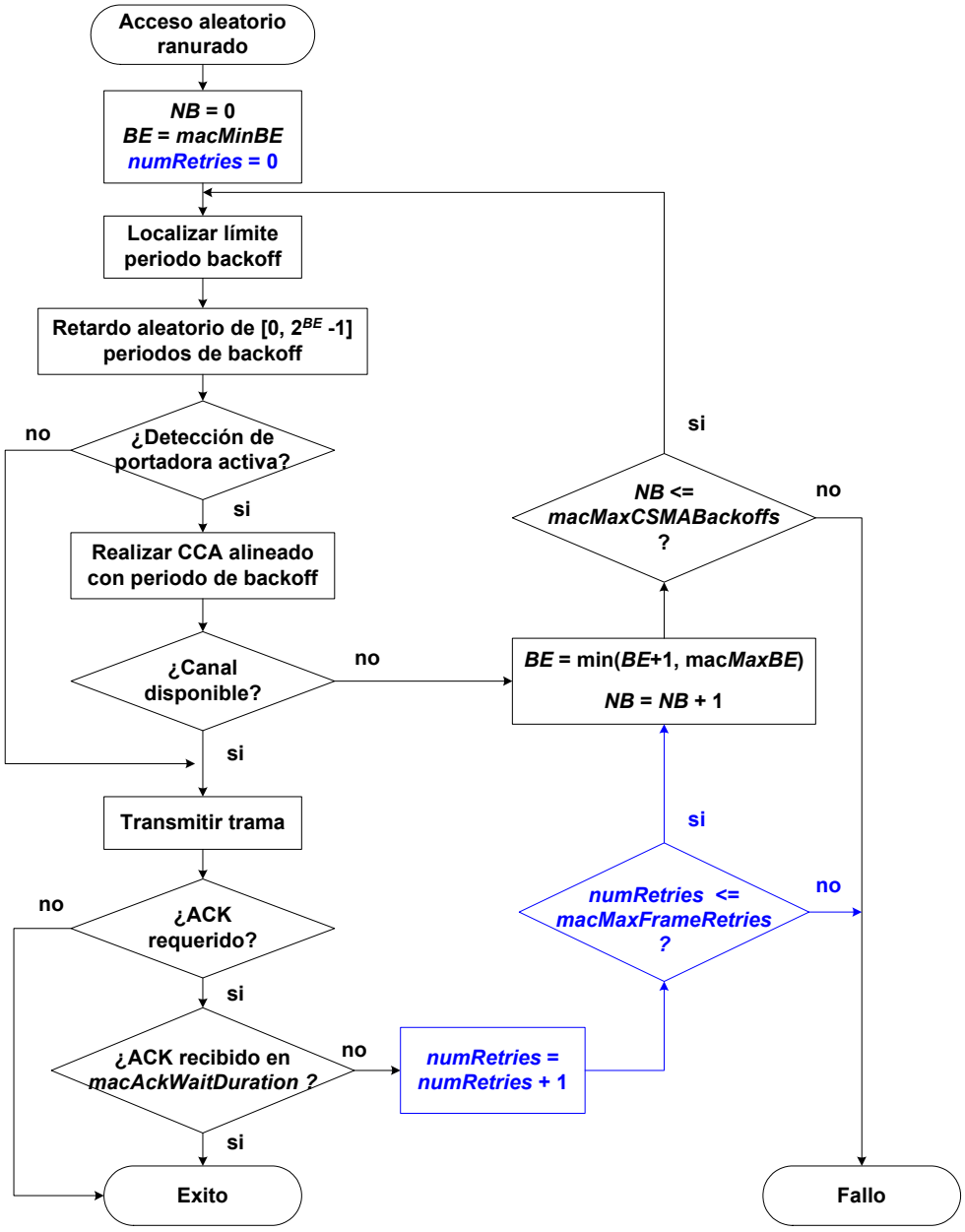


Figura 4.5 – Algoritmo de acceso aleatorio implementado en el modelo de simulación.

4.4.3 Caracterización del tráfico de la capa de aplicación

Para evaluar el rendimiento de las comunicaciones *uplink* en el modelo de simulación, la capa de aplicación en cada dispositivo genera paquetes de datos destinados al coordinador. Los intervalos de tiempo entre los paquetes siguen una distribución de probabilidad exponencial. Cada paquete se encapsula en la MSDU de una trama de datos de la capa MAC.

Si los paquetes generados en la capa de aplicación tienen un tamaño de L bits y el tiempo medio entre paquetes es t_s segundos, la aplicación en cada dispositivo producirá una carga de media de transmisión sobre la red T_L igual a:

$$T_L = \frac{L}{t_s} \quad (bps) \tag{4.1}$$

Por conveniencia, la carga de transmisión puede expresarse de forma normalizada como un porcentaje de la velocidad de transmisión empleada en la capa física para las transmisiones uplink. De esta forma, si R_b es el régimen binario o velocidad de transmisión - en bits por segundo - la carga de transmisión normalizada resultará:

$$T_L = \frac{L}{t_s \cdot R_b} \quad (\%) \tag{4.2}$$

Para evaluar el rendimiento de las transmisiones uplink se han diseñado varios escenarios que difieren en el número de dispositivos N (4, 8, 12 y 16) que forman parte de la red en estrella simulada. En todos los escenarios la capa de aplicación emplea la misma configuración para todos los dispositivos, con lo que la carga total ofrecida sobre la red resultará:

$$T_T = N \cdot T_L = N \cdot \frac{L}{t_s \cdot R_b} \quad (\%) \tag{4.3}$$

Para analizar el rendimiento de la red se realizan simulaciones con distintos valores de carga ofrecida, T_T , con el fin de evaluar los resultados obtenidos en los distintos escenarios bajo diferentes condiciones de funcionamiento.

5. Análisis de los resultados de las simulaciones

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas con el modelo implementado. Los efectos del problema del nodo oculto se evalúan comparando los resultados de simulaciones realizadas cuando no hay nodos ocultos con resultados de simulaciones en las que sí existen nodos ocultos en la red.

Para garantizar la fiabilidad de los resultados se han replicado varias simulaciones independientes para un mismo conjunto de parámetros de entrada - de acuerdo a la configuración seleccionada - y se han promediado los valores de salida obtenidos. El tiempo de simulación ha sido de al menos 400 segundos para cada réplica de cada simulación.

5.1 Prestaciones de las comunicaciones uplink sin nodos ocultos

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones cuando no existen nodos ocultos en la red. Para eliminar la posibilidad de que hayan nodos ocultos se ha empleado un modelo de canal que específicamente impide la aparición de los mismos, tal y como se detalla a continuación.

5.1.1 Modelo de canal utilizado

Para excluir la existencia de nodos ocultos en la red debido a la directividad de los transmisores y receptores ópticos (véase apartado 2.4), en el modelo de simulación se modificó el modelo de canal LOS (presentado en el apartado 2.3.3) para eliminar las características de directividad en los mismos. De esta forma, se eliminaron de la fórmula de la ganancia del canal los factores que dependen de la directividad del transmisor y del receptor, así como de la orientación de los mismos. Con esta modificación, la expresión de la ganancia del canal resulta según la siguiente expresión:

$$H(0) = \frac{1}{2\pi \cdot d^2} \cdot A \cdot G \cdot T \tag{5.1}$$

Donde d es la distancia que separa al transmisor del receptor, A es el área del elemento fotodetector, G es la ganancia del concentrador óptico del receptor y T el coeficiente de transmisión del filtro óptico del receptor.

Adicionalmente, para evitar la aparición de nodos ocultos debido a la limitación en el alcance de la señal óptica, se configuró a los dispositivos con una potencia óptica de transmisión de 150 mW. Este valor, aunque excede los valores de potencia óptica utilizados habitualmente en los dispositivos móviles, garantiza que en todos los escenarios la totalidad de las transmisiones son detectadas por todos los dispositivos en el recinto simulado.

Empleando el modelo de canal descrito, se verificó que en los cuatro escenarios de simulación – con 4, 8, 12 y 16 dispositivos respectivamente – cada uno de los dispositivos de la red detecta las transmisiones del resto, con lo que se descarta la existencia de nodos ocultos en la red. Este modelo de canal, aunque no se corresponde con ninguna de las configuraciones de enlace aplicables a redes basadas en tecnologías VLC, permite establecer las condiciones de simulación que garantizan la no existencia de nodos ocultos en la red.

Los resultados de simulación obtenidos con estas condiciones serán comparados con los resultados de las mismas simulaciones realizadas con el modelo de canal LOS directivo, con el fin de evaluar el impacto que la existencia de nodos ocultos tiene en las prestaciones de la red.

5.1.2 Parámetros de simulación de la capa PHY

En la tabla 5.1 se indican los principales parámetros de configuración de la capa PHY establecidos para los cuatro escenarios de simulación, para el caso en que no existen nodos ocultos en la red:

Parámetro	Valor
Velocidad de transmisión (MCS-ID 16)	1,25 Mbps
Frecuencia del reloj óptico (MCS-ID 16)	3,75 MHz
Potencia óptica de transmisión del coordinador	1.500 mW
Potencia óptica de transmisión de los dispositivos	150 mW
Área del elemento foto detector (*A*)	1 cm2
Responsividad del foto detector (*R*)	0,54
Ganancia del concentrador óptico (*G*)	15
Coeficiente de transmisión del filtro óptico (*T*)	1
Duración de la función CCA	8 ciclos de reloj
aTurnaroundTime-TX-RX	0 ciclos de reloj
aTurnaroundTime-RX-TX	8 ciclos de reloj

Tabla 5.1 –Parámetros de configuración de la capa PHY cuando no hay nodos ocultos.

En todas las simulaciones se ha seleccionado el modo de funcionamiento PHY II, destinado para su uso en entornos tanto interiores como exteriores. De entre los posibles modos de operación pertenecientes al PHY II se ha seleccionado el MCS-ID 16, ya que su velocidad de transmisión y frecuencia de reloj óptico han de ser soportadas obligatoriamente por todos los dispositivos que empleen el PHY II.

En lo referente a los valores seleccionados para el área y la responsividad del foto detector, la ganancia del concentrador y el coeficiente de transmisión del filtro, se han seleccionado valores comúnmente empleados para caracterizar los transmisores y receptores de redes VLC, y similares a los usados en [Deqiang07], [Komine03] y [Tronghop12].

El estándar IEEE 802.15.7 no especifica valores para el tiempo de detección de la actividad en el canal que se realiza en la función CCA, a diferencia de lo que ocurre en

otros estándares como IEEE 802.15.4, en el que se especifica un tiempo de duración equivalente a 8 símbolos. Para configurar el tiempo de detección de actividad en el canal se ha decidido emplear una duración equivalente a 8 ciclos de reloj, valor que es usado en varios trabajos publicados relacionados con el estándar IEEE 802.15.7, como [Musa13] y [Wang15b]. El modo de detección empleado en la función CCA implementada se corresponde con el modo *CCA Mode-3*.

En lo referente al parámetro *aTurnaroundTime-RX-TX*, que establece el tiempo necesario para que el transceptor óptico cambie su estado de recepción a transmisión, el estándar IEEE 802.15.7 fija un valor máximo de 5.120 ciclos de reloj cuando se usa el modo PHY II. Tomando como referencia los trabajos antes reseñados, [Musa13] y [Wang15b], se ha seleccionado para este parámetro un valor de 8 ciclos de reloj.

Por último, indicar que en todas las simulaciones realizadas se ha considerado como despreciable la contribución del ruido producido en el canal (ruido térmico y ruido *shot*). Con ello, además de simplificarse la implantación del modelo de simulación, se garantiza que los fallos en las transmisiones de tramas estén causados únicamente por colisiones (transmisiones simultáneas en la red). De esta forma, se descarta que el nivel de ruido o los errores de transmisión puedan afectar a los resultados de las simulaciones.

5.1.3 Parámetros de simulación de la capa MAC

En cuanto a la configuración de la supertrama, se ha asignado el mismo valor a los parámetros *BO* (*macBeaconOrder*) y *SO* (*macSuperframeOrder*) con el fin de que no haya parte inactiva en la misma. Dado que se pretende evaluar las prestaciones de las comunicaciones *uplink* realizadas durante el periodo de acceso con contención (CAP), se ha decidido no asignar ningún *slot* de la supertrama al periodo de acceso sin contención (CFP). De esta forma, la totalidad de la duración de la supertrama queda disponible para realizar transferencias con contención, mediante el método de acceso al medio basado en el algoritmo CSMA/CA ranurado.

El valor asignado a los parámetros *BO* y *SO* dependerá de que la red se encuentre o no en condición de tráfico saturado, según las condiciones de simulación que se fijarán en los apartados 5.1.5 y 5.1.7.

Al atributo *macAckWaitDuration*, que define el tiempo máximo de espera por las tramas de confirmación (ACK) en el algoritmo CSMA/CA, se le asigna - de acuerdo al estándar - el valor que resulta de la siguiente expresión:

$$macAckWaitDuration = t_{backoff} + t_{aTurnaroundTime\text{-}RX\text{-}TX} + t_{ACK} \quad (5.2)$$

Donde:

$t_{backoff}$: duración de un periodo de *backoff*. Es el máximo tiempo de espera necesario para transmitir la trama ACK alineada con los periodos de *backoff* de la supertrama.

$t_{aTurnaroundTime\text{-}RX\text{-}TX}$: tiempo necesario para que la capa PHY cambie su estado de recepción a transmisión.

t_{ACK} : tiempo necesario para transmitir de la trama de confirmación.

La expresión (5.2) establece el tiempo máximo de espera por las tramas de confirmación de acuerdo a lo especificado en el estándar IEEE 802.15.7. No obstante, en el modelo de simulación implementado existe la posibilidad de agregar un tiempo adicional, para tener en cuenta los retardos de propagación de la señal óptica en el medio de transmisión.

En la tabla 5.1 se indican los valores establecidos para los restantes parámetros de configuración de la capa MAC. Los valores seleccionados se corresponden con los valores por defecto fijados en el estándar para dichos atributos.

Parámetro	**Valor**
macMaxBE	5
macMinBE	3
macMaxCSMABackoffs	4
macMaxFrameRetries	3

Tabla 5.2–Parámetros de configuración de la capa MAC.

5.1.4 Parámetros de simulación de la capa de aplicación y la cola Ifq

En cuanto a la capa de aplicación, se han configurado tres tamaños de paquete para las simulaciones: 512 bytes, 1.024 bytes y 1.500 bytes. El mayor tamaño de paquete se ha seleccionado por ser igual al tamaño de la máxima unidad de transmisión, MTU (*Maximum Transmission Unit*), del estándar Ethernet. Para cada tamaño de paquete, la carga total producida por la capa de aplicación depende del intervalo de tiempo medio entre paquetes, tal y como se indicó en el apartado 4.4.3.

De acuerdo a la arquitectura del modelo de simulación implementado (véase el apartado 4.2.3) los paquetes de la capa de aplicación, tras pasar por la capa de red y ser almacenados en la cola Ifq, pasan a la capa MAC para ser encapsulados y transmitidos en tramas. Cada paquete de la capa de aplicación se encapsula en la MSDU de una trama. En las simulaciones realizadas se ha configurado el tamaño de la cola Ifq con capacidad para almacenar un paquete de la capa aplicación.

5.1.5 Condiciones de simulación con tráfico saturado

El principal objetivo con que se han realizado las simulaciones con tráfico saturado es poder contrastar los valores obtenidos del modelo de simulación con los resultados presentados en otros trabajos publicados, como los reseñados en el apartado 4.3. Concretamente, se han utilizado como referencia los resultados presentados en [Nobar15], donde se evalúan las prestaciones de la red cuando ésta se encuentra en condición de tráfico saturado, condición que implica que siempre hay una trama disponible para ser transmitida en la capa MAC de cada dispositivo.

En el trabajo referido se modela el canal de transmisión como ideal, no considerándose los efectos de la propagación en el medio de transmisión sobre la señal óptica recibida. La aplicación de este modelo de canal trae como consecuencia dos premisas importantes en cuanto a la caracterización de la red:

- No pueden existir nodos ocultos, ya que no se considera la directividad en los transmisores ni receptores, y no hay pérdidas de potencia óptica en el canal debidas a la distancia de separación entre los nodos.
- La única causa que puede producir un fallo en la transmisión de una trama es la colisión producida por la transmisión simultánea de dos o más nodos.

Las dos premisas citadas se verifican en el modelo de simulación implementado cuando se emplea la configuración de la capa PHY mediante la que se elimina la posible existencia de nodos ocultos en la red.

Otras características fijadas en el modelo presentado en [Nobar15] en cuanto al funcionamiento de la capa MAC son:

- Envío de tramas de confirmación (ACK) por el coordinador para confirmar la recepción de las tramas de datos enviadas por los dispositivos.
- Uso de la función CCA para detectar el estado del canal antes de transmitir, empleándose el algoritmo de acceso aleatorio CSMA/CA ranurado para acceder al canal.
- Uso de la supertrama como marco de referencia temporal, dedicándose la totalidad del tiempo disponible en la misma a la parte activa, y al periodo de acceso con contención (CAP).

Todas las características mencionadas están incorporadas igualmente en el modelo de simulación implementado para esta tesis. No obstante hay que mencionar que, con el fin de simplificar su modelo, en [Nobar15] no se contempla la transmisión periódica de tramas baliza para delimitar las supertramas, lo que equivale decir que en su modelo se considera una supertrama de duración infinita.

Para equiparar lo más posible el modelo implementado a una configuración de supertrama de duración infinita, se han realizado las simulaciones con tráfico saturado empleando el mayor valor permitido para los parámetros *BO* (*macBeaconOrder*) y *SO* (*macSuperframeOrder*) cuando se transmiten tramas baliza. De esta forma, ambos parámetros han sido configurados con el siguiente valor:

$$BO = SO = 14 \tag{5.3}$$

Para satisfacer la condición de que la red se encuentre en condición de tráfico saturado es necesario garantizar que siempre haya una trama de datos disponible para ser transmitida por la capa MAC en cada nodo. En el modelo implementado, la condición de tráfico saturado se ha satisfecho configurando el tiempo medio con que se generan los paquetes de la capa de aplicación con valores que garanticen que la capa MAC nunca se

quede sin paquetes de datos disponibles para encapsular y transmitir. Con los parámetros de configuración empleados, la condición de tráfico saturado se consigue configurando los tiempos medios entre paquetes con valores del orden de unas pocas decenas de microsegundos.

5.1.6 Resultados de simulación con tráfico saturado

Se ha usado el *throughput* normalizado como métrica para la comparación entre los resultados presentados en [Nobar15] y los obtenidos del modelo de simulación implementado. En [Nobar15], se define como *throughput* normalizado el porcentaje de tiempo que la red ha estado transmitiendo tramas de datos con éxito, incluyendo el tiempo necesario para la transmisión de los bits añadidos por las capas PHY y MAC. Esta definición de *throughput* ha sido utilizada para obtener los resultados del modelo de simulación implementado que se presentan en este apartado.

En la tabla 5.3 se indican los valores de *throughput* obtenidos con el modelo implementado y los valores correspondientes a las gráficas de resultados presentadas en [Nobar15].

N **(numero de dispositivos en la red)**	***Throughput*** **(modelo implementado)**	***Throughput*** **[Nobar15]**
4	71%	70%
8	57%	65%
12	48%	55%

Tabla 5.3 – Valores de *throughput* con tráfico saturado.

Los valores presentados en la tabla 5.3 muestran que cuando la red está en condición de tráfico saturado, el *throughput* disminuye según aumenta el número de dispositivos en la red. Al aumentar el número de dispositivos se incrementa la carga total sobre la red, aumentado la probabilidad de que existan colisiones y disminuyendo la probabilidad de que cada dispositivo encuentre el canal disponible para transmitir.

Los valores de *throughput* de la tabla 5.3 obtenidos del modelo de simulación implementado corresponden a un tamaño de paquete de la capa de aplicación de 1.024 Bytes. En cuanto a los valores obtenidos de [Nobar15], no se especifica el tamaño de paquete con el que fueron obtenidos. Si bien no puede concluirse que la comparación de los valores de *throughput* puede servir como validación estricta de los resultados de un modelo con los del otro, sí se puede afirmar que los resultados obtenidos en ambos se encuentran en órdenes de magnitud similares.

5.1.7 Condiciones de simulación con tráfico no saturado

Para evaluar las prestaciones de la red con tráfico no saturado - manteniendo la configuración que excluye la existencia de nodos ocultos - se realizaron múltiples simulaciones variando la carga total ofrecida entre el 1% y el 200% de la velocidad de transmisión.

Las simulaciones se repitieron empleando los tamaños de paquete de la capa de aplicación de 512 Bytes, 1.024 Bytes y 1.500 Bytes. No obstante, se comprobó que – con tráfico no saturado y manteniendo fijos el resto de parámetros de configuración – los resultados de las simulaciones no se ven afectados de forma significativa por el tamaño de paquete de aplicación usado, manteniéndose el margen de variación de los resultados por debajo del 5%. Por ello, se ha decidido presentar - en este apartado y en los posteriores - únicamente los resultados obtenidos con el tamaño de paquete intermedio de 1.024 Bytes.

En cuanto a la longitud de la supertrama, las simulaciones con tráfico no saturado se han configurado con el siguiente valor para los parámetros *BO* (*macBeaconOrder*) y *SO* (*macSuperframeOrder*):

$$BO = SO = 9 \tag{5.4}$$

Se ha usado el valor indicado por ser éste el mínimo que permite que en cada supertrama todos los dispositivos de la red tengan opción de transmitir una trama de datos en todos los escenarios (con N = 4, 8, 12 y 16 dispositivos), de acuerdo a las condiciones fijadas para la simulación.

Con la frecuencia de reloj de 3,75 MHz (de acuerdo al modo de operación seleccionado MCS-ID 16) y el valor asignado para *BO* y *SO*, resulta una duración de la parte activa de la supertrama, *SD*, igual al intervalo entre tramas baliza, *BI*, teniendo ambos el siguiente valor:

$$SD = BI = 1{,}310 \cdot 10^{-1} \quad segs \tag{5.5}$$

El valor de duración de la supertrama indicado da cabida para que en ella se puedan realizar con éxito hasta 16 transmisiones de tramas de datos, considerando el tiempo medio necesario para que un dispositivo transmita una trama de datos con éxito en el primer intento empleando el algoritmo CSMA/CA, con una velocidad de transmisión de 1,25 Mbps (modo MCS-ID 16) y un tamaño de paquete de aplicación de 1.024 Bytes.

Se realizaron también simulaciones asignando valores superiores a los parámetros *BO* y *SO*, hasta alcanzar el máximo que permite el estándar cuando se utiliza la supertrama (*SO* = *BO* = 14). Se comprobó que las prestaciones de la red tienden a mejorar a medida que aumenta el valor de *BO* y *SO*. No obstante, los resultados de las simulaciones que se presentan a continuación se han obtenido con los valores de *BO* y *SO* indicados en (5.4).

5.1.8 Resultados de simulación con tráfico no saturado

A partir de las simulaciones realizadas se han evaluado las prestaciones de la red haciendo uso de las siguientes métricas:

- ***Goodput* extremo a extremo**: calculado como el número medio de bits por unidad de tiempo de los paquetes de la capa de aplicación recibidos en el coordinador. Este valor se ha normalizado, expresándolo como el porcentaje de la velocidad de transmisión empleada en la capa PHY. Se ha preferido usar el *goodput* en vez del *throughput* (empleado en el apartado 5.1.6), porque el *goodput* cuantifica la tasa neta de transmisión obtenida a partir del servicio ofrecido por la capa MAC.
- **Tasa de pérdida de paquetes extremo a extremo**: porcentaje del total de paquetes de la capa de aplicación generados en los dispositivos que no son recibidos en el coordinador. Los paquetes no llegan a ser recibidos en el

coordinador por ocurrir una de las siguientes causas: por desbordamiento en la cola Ifq de los dispositivos, por producirse fallos de acceso al canal (al sobrepasarse el límite *macMaxCSMABackoff*), o por haber fallos de transmisión de trama (al sobrepasarse el límite *macMaxFrameRetries*) durante la ejecución del algoritmo CSMA/CA en los dispositivos.

- **Estadísticas del CSMA/CA**: de la ejecución del algoritmo de acceso aleatorio en cada dispositivo se han obtenido diversas estadísticas, como el porcentaje de tramas transmitidas con éxito, el porcentaje de colisiones (tramas de confirmación no recibidas), el porcentaje de fallos de acceso al canal (por sobrepasarse *macMaxCSMABackoff*) y el de fallos de transmisión de trama (por sobrepasarse *macMaxFrameRetries*).

- **Tiempos de transacciones CSMA/CA**: calculados tanto para las transacciones terminadas con éxito como para las transacciones fallidas. En las transacciones terminadas con éxito se calcula el tiempo transcurrido desde el instante en que cada trama de datos comienza a ser procesada por el algoritmo CSMA/CA, hasta el momento en que se recibe su trama de confirmación. En las transacciones terminadas con fallo, el tiempo se contabiliza hasta el instante en que la trama es descartada por sobrepasarse los límites máximos *macMaxCSMABackoff* o *macMaxFrameRetries*.

- **Consumo de energía**: calculado a partir de la corriente eléctrica consumida por los transceptores ópticos de los dispositivos. Este consumo se ha modelado dependiendo de los distintos estados que pueden tomar dichos transceptores.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada una de las métricas citadas.

Goodput y tasa de pérdida de paquetes

En la figura 5.1 se representan los valores de *goodput* obtenidos para los cuatro escenarios (con $N = 4$, 8, 12 y 16 dispositivos) en función de la carga total ofrecida sobre la red.

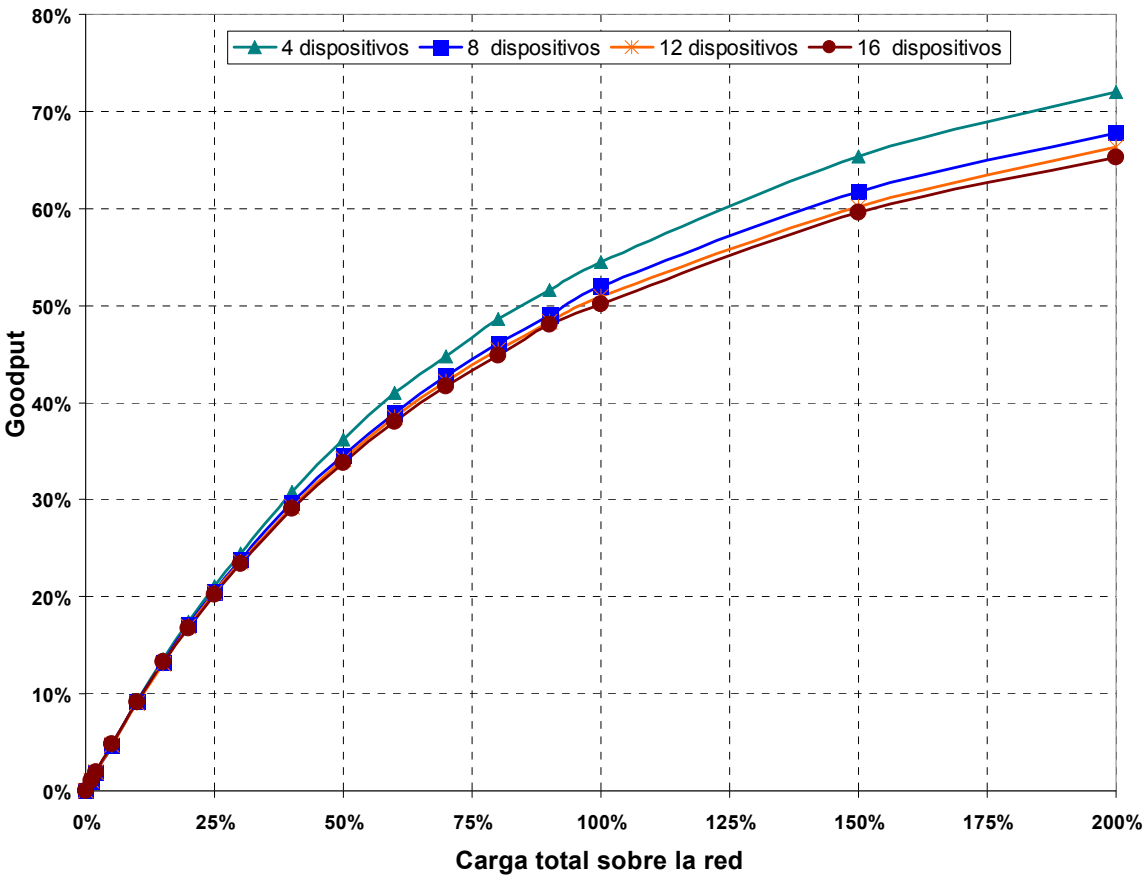


Figura 5.1 –*Goodput* en función de la carga sobre la red, sin nodos ocultos.

En la figura 5.1 puede observarse cómo aumenta el valor del *goodput* a medida que aumenta la carga, si bien se observa que cuanto mayor es ésta, menor es el *goodput* en los escenarios con mayor número de dispositivos en la red. Esto se justifica porque cuanto mayor es el número de dispositivos en la red, mayor es el porcentaje de colisiones para una misma carga total ofrecida, como puede comprobarse a partir de las estadísticas obtenidas del funcionamiento del algoritmo CSMA/CA que se presentan a continuación, en la tabla 5.4. El aumento de las colisiones con el número de dispositivos contribuye a que el *goodput* disminuya y la tasa de pérdida de paquetes aumente cuando el número de dispositivos se incrementa.

Aunque el objetivo de los resultados presentados en este apartado es evaluar las prestaciones de la red cuando ésta se encuentra en condición de tráfico no saturado, se ha comprobado que para valores de carga mayores al 200%, el *goodput* continúa aumentando hasta alcanzar un valor máximo, que representa el punto de equilibrio entre

la carga y la capacidad de transmisión de la red. A partir de este punto, si la carga continúa aumentando, los resultados del *goodput* en cada escenario comienzan a disminuir, hasta tomar finalmente los valores correspondientes al estado en que la red se encuentra en condición de tráfico saturado.

En la figura 5.2 se representan los valores obtenidos para la tasa de pérdida de paquetes, pudiendo comprobarse cómo aumenta la misma tanto con la carga como con el número de dispositivos de la red. Dicha dependencia queda justificada en detalle con las estadísticas obtenidas del funcionamiento del algoritmo CSMA/CA que se presentan a continuación.

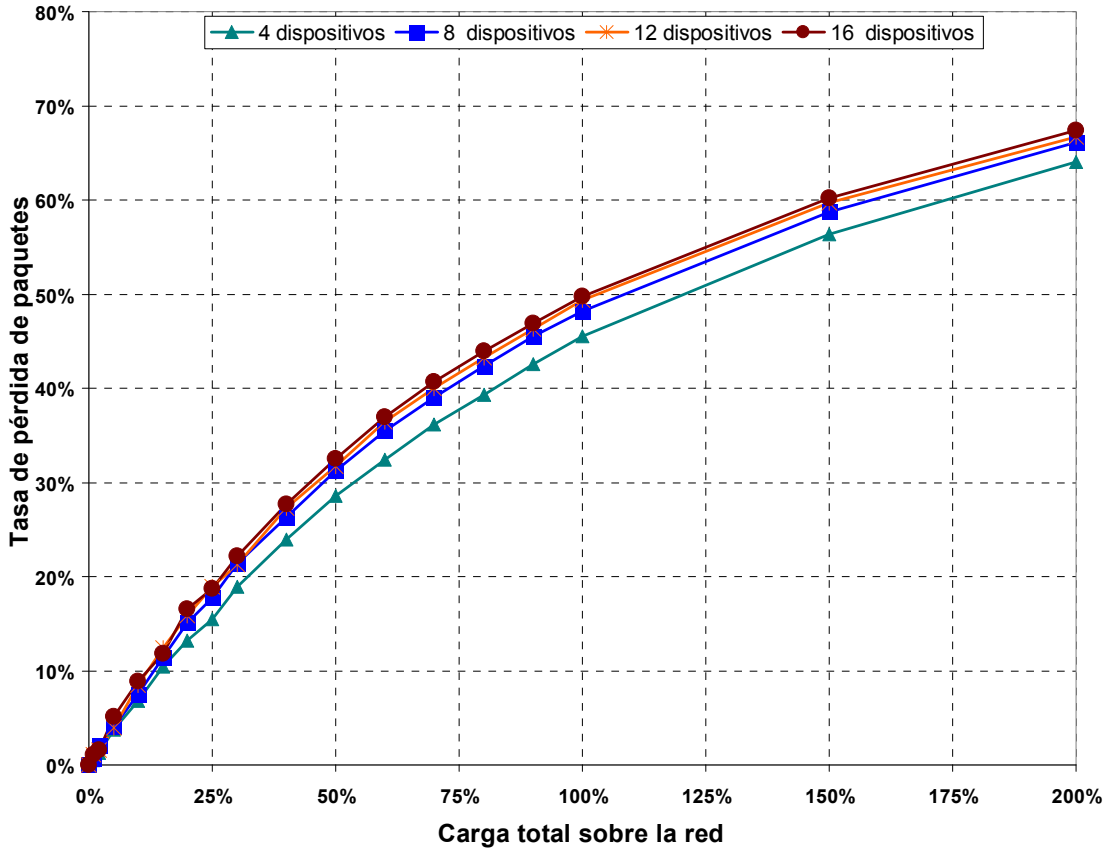


Figura 5.2 – Tasa de pérdida de paquetes, sin nodos ocultos.

Estadísticas del CSMA/CA

Para analizar cómo el algoritmo de acceso al canal CSMA/CA afecta al *goodput* y a la tasa de pérdida de paquetes, se han obtenido estadísticas detalladas de su

funcionamiento en la capa MAC de los dispositivos. La tabla 5.4 muestra los resultados de las estadísticas obtenidas para los escenarios de 4 y 16 dispositivos, para tres valores de carga seleccionados: 10%, 50% y 200%. Los valores de las estadísticas mostradas se han calculado promediando los resultados obtenidos en todos los dispositivos de cada escenario.

La tabla 5.4 muestra los valores de las siguientes estadísticas:

- **Tramas transmitidas con éxito**: porcentaje de las tramas de datos que han sido transmitidas por los dispositivos y reconocidas mediante tramas de confirmación enviadas por el coordinador. Este porcentaje está calculado sobre el total de las tramas de datos que la capa MAC intenta transmitir.
- **Fallos de acceso al canal**: porcentaje de tramas para las que el algoritmo CSMA/CA ha terminado con fallo por haberse excedido el límite del número máximo de *backoffs* (*macMaxCSMABackoffs*, véase el apartado 4.4.2). Las tramas terminadas con fallo - y los paquetes de aplicación encapsulados en ellas - son descartadas por la capa MAC en los dispositivos. Este porcentaje está calculado sobre el total de las tramas de datos que la capa MAC intenta transmitir.
- **Fallos de transmisión de trama**: porcentaje de tramas para las que el algoritmo CSMA/CA ha terminado con fallo por excederse el límite máximo del número de reintentos de transmisión (*macMaxFrameRetries*, véase el apartado 4.4.2). Las tramas afectadas - y los paquetes encapsulados en ellas - son descartadas por la capa MAC en los dispositivos. Este porcentaje está calculado sobre el total de tramas de datos que la capa MAC intenta transmitir.
- **Colisiones**: porcentaje de las transmisiones de tramas realizadas para las que no se ha recibido su correspondiente trama de reconocimiento, por haberse producido un fallo en la transmisión. De acuerdo con las condiciones de simulación fijadas, la única causa que puede provocar el fallo en la transmisión de una trama es una colisión. Este porcentaje está calculado sobre el total de las transmisiones de tramas de datos realizadas por la capa MAC.

N **(numero de dispositivos)**	**Carga total ofrecida**	**Tramas transmitidas con éxito**	**Fallos de acceso al canal**	**Fallos de transmisión de trama**	**Colisiones**
4	**10%**	93.2%	6.8%	0%	0.5%
	50%	71.8%	28.2%	0%	2.9%
	200%	38.2%	61.8%	0%	11.0%
16	**10%**	91.1%	8.9%	0%	0.8%
	50%	67.4%	32.6%	0%	3.8%
	200%	32.8%	67.2%	0%	14.2%

Tabla 5.4 – Estadísticas obtenidas del CSMA/CA, sin nodos ocultos.

En la tabla 5.4 se observa que el porcentaje de tramas transmitidas con éxito disminuye a medida que aumentan la carga y el número de dispositivos en la red, lo cual corrobora los resultados de tasa de pérdida de paquetes presentados en la figura 5.2. No obstante, hay que tener en cuenta que en la tasa de pérdida de paquetes se contabilizan también los paquetes de la capa de aplicación que no llegan a la capa MAC, a causa del desbordamiento de la cola Ifq.

A modo de ejemplo, se puede indicar que en el escenario con 4 dispositivos y con la carga del 200%, el porcentaje de tramas transmitidas con éxito referido al total de tramas procesadas en la capa MAC es del 38,2% (según se indica en la tabla 5.4). En el mismo escenario y con la misma carga, se verifica (según los valores de tasa de pérdida de paquetes de la figura 5.2) que el porcentaje de paquetes transmitidos con éxito se reduce a un 36%. La diferencia entre ambos porcentajes se debe a los paquetes de la capa de aplicación que no llegan a la capa MAC por el desbordamiento de la cola Ifq.

Los valores mostrados en la tabla 5.4 muestran que, en ausencia de nodos ocultos, todos los fallos producidos en el algoritmo CSMA/CA están contabilizados en la columna de fallos de acceso al canal, producidos cuando se excede el límite *macMaxCSMABackoffs*. El número de retransmisiones de tramas por colisiones no es lo suficientemente alto como para provocar fallos en el algoritmo CSMA/CA al excederse el límite máximo de retransmisiones (*macMaxFrameRetries*), como puede observarse en la columna de fallos de transmisión de tramas, cuyo valor es siempre del 0%.

Los valores presentados en la tabla 5.4 - así como los resultados obtenidos para lo restantes niveles de carga y el resto de escenarios - muestran que el porcentaje de colisiones aumenta con la carga y con el número de dispositivos en la red, como ya se indicó cuando se analizaron los resultados de *goodput* y tasa de pérdida de paquetes.

No obstante, los valores de la tabla muestran que cuando no hay nodos ocultos en la red, el porcentaje de colisiones se mantiene en valores relativamente bajos, estando en todos los casos por debajo del 15%. Prueba de ello es que, para el caso peor - en el escenario con mayor número de dispositivos (16) y la carga más alta (200%) - el porcentaje de colisiones es de sólo un 14,2%.

A partir de los valores de porcentajes de colisiones obtenidos se puede concluir que, cuando no hay nodos ocultos en la red, la causa principal que provoca los fallos de acceso al canal en el algoritmo CSMA/CA es que el medio de transmisión se detecta ocupado cuando se invoca función CCA.

Tiempos de transacciones CSMA/CA

En la figura 5.3 se representan los valores de los tiempos medios de las transacciones CSMA/CA terminadas con éxito, en función de la carga total ofrecida sobre la red. Los valores presentados en dicha figura son los promedios de los tiempos obtenidos en todos los dispositivos, calculados a partir del intervalo transcurrido desde el instante en que comienza el proceso de cada trama de datos en el algoritmo CSMA/CA, hasta el momento en que se recibe su correspondiente trama de confirmación (ACK).

La figura 5.3 muestra que los tiempos de las transacciones terminadas con éxito aumentan con la carga, y tienden a incrementarse según aumenta el número de dispositivos en la red.

De los valores representados en la figura 5.3 y los resultados de simulación obtenidos, se comprueba que el máximo tiempo de las transacciones terminadas con éxito se obtiene para la carga ofrecida del 200% y para el escenario de 16 dispositivos. El valor de este tiempo máximo resulta ser:

$$t_{max} = 7{,}48 \cdot 10^{-3} \text{ segs.} \tag{5.6}$$

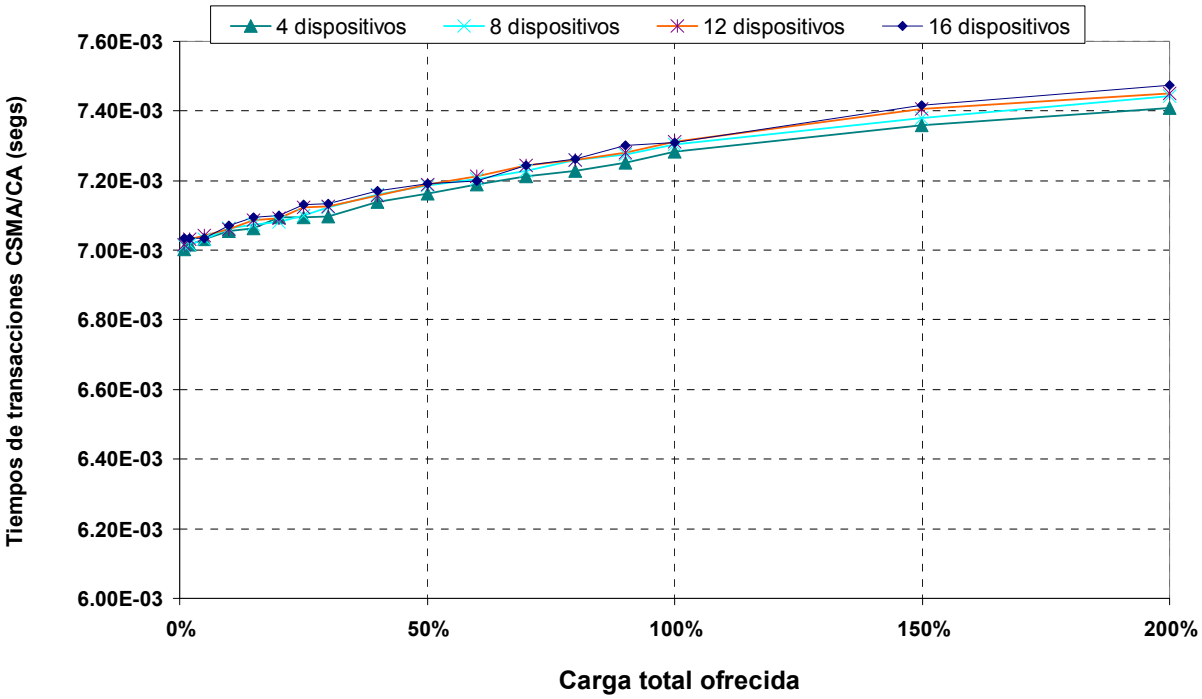


Figura 5.3 – Tiempos de transacciones CSMA/CA terminadas con éxito, sin nodos ocultos.

Con las condiciones de simulación fijadas, de acuerdo a los parámetros de configuración establecidos, el tiempo necesario para realizar la transmisión de una trama de datos y su correspondiente trama de confirmación resulta:

$$t_{trama+ack} = 6{,}81 \cdot 10^{-3} \text{ segs.} \qquad (5.7)$$

En consecuencia, de la comparación de los tiempos de las expresiones (5.6) y (5.7) puede concluirse que, en promedio, la mayoría de las transacciones realizadas con éxito finalizan tras la realización de una única transmisión de la trama de datos. Esta conclusión está en concordancia con los porcentajes de colisiones obtenidos del análisis de las estadísticas del CSMA/CA que se presentaron en la tabla 5.4.

En la figura 5.4 se representan los valores de los tiempos medios de las transacciones CSMA/CA terminadas con fallo en función de la carga total ofrecida. En el cálculo de dichos tiempos se incluyen tanto las transacciones que terminan con fallos de acceso al canal (por sobrepasarse el límite *macMaxCSMABackoff*) como las que - en su

caso - terminen con fallos de transmisión de trama (por sobrepasarse el límite *macMaxFrameRetries*). Sin embargo, ya se indicó que las estadísticas obtenidas del CSMA/CA (presentadas en la tabla 5.4) confirman que cuando no hay nodos ocultos todas las transacciones que no tienen éxito terminan con fallos de acceso al canal.

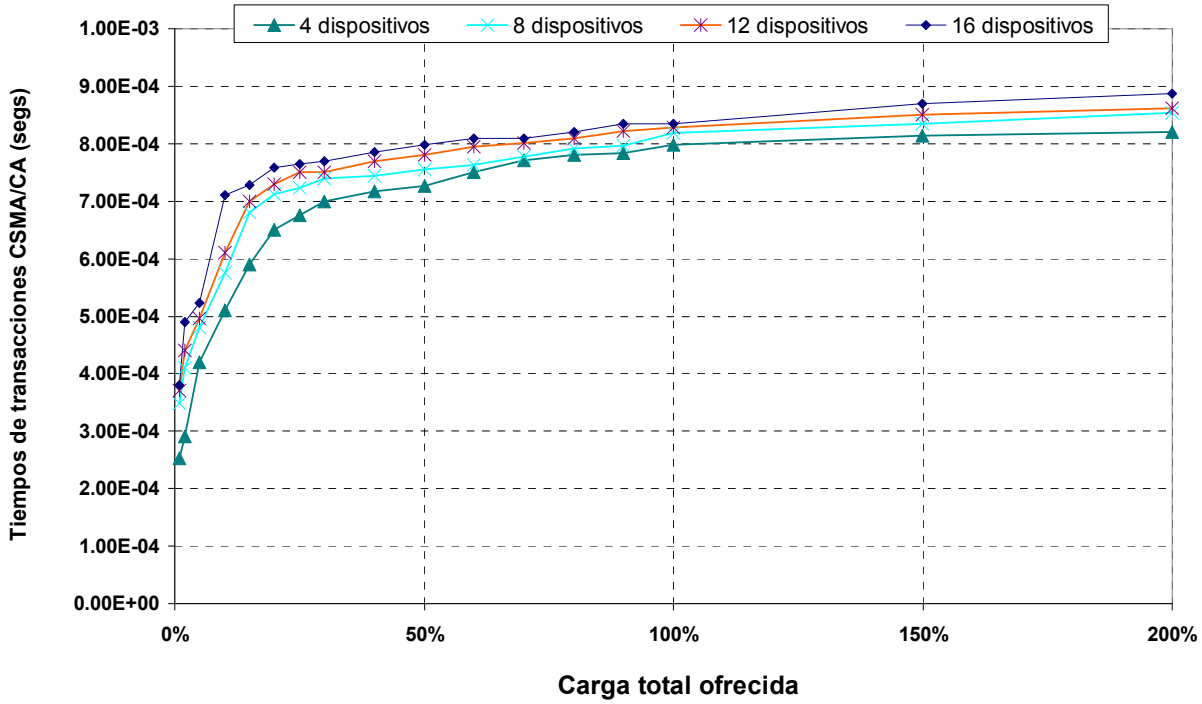


Figura 5.4 - Tiempos de transacciones CSMA/CA terminadas con fallo, sin nodos ocultos.

En la figura 5.4 puede comprobarse que los tiempos máximos de las transacciones terminadas con fallo se mantienen siempre por debajo los $9 \cdot 10^{-4}$ segs. Considerando el tiempo necesario para la transmisión de una trama de datos y su correspondiente trama de confirmación, de acuerdo a (5.7), se puede concluir que en la mayoría de las transacciones que no tienen éxito se sobrepasa el límite máximo de *backoffs* (*macMaxCSMABackoffs*) al detectarse el canal ocupado sin que, en muchos casos, haya podido llegar a realizarse siquiera una transmisión de la trama de datos. Esta conclusión se ve corroborada con los valores de porcentajes de colisiones ya mencionados.

Consumo de energía

Los resultados de consumo de energía presentados en este apartado se han calculado a partir de los promedios de los consumos de corriente realizados por los transceptores de los dispositivos de la red, a lo largo del tiempo total de simulación.

De acuerdo al estándar IEEE 802.15.7, se definen tres estados principales por los que puede pasar el transceptor óptico:

1. Receptor habilitado (*RX_ON*).
2. Transmisor habilitado (*TX_ON*).
3. Transceptor deshabilitado (*TRX_OFF*).

En el modelo de simulación se han desdoblado los estados de recepción (*RX_ON*) y transmisión (*TX_ON*) para diferenciar cuándo el transceptor se encuentra propiamente recibiendo (*RECV*) o transmitiendo (*TRANSMIT*), y cuándo está simplemente habilitado y listo para recibir/transmitir (*IDLE*). En la tabla 5.5 se indica la correspondencia entre los estados definidos en el estándar y los definidos en el modelo de simulación, así como los valores de consumo asignados a cada uno de los mismos.

Estado según el estándar	**Estado en el modelo de simulación**	**Consumo**
RX_ON	*IDLE*	1,38 mA
	RECV	9,6 mA
TX_ON	*IDLE*	1,38 mA
	TRANSMIT	17 mA
TRX_OFF	*TRX_OFF*	0,06 mA

Tabla 5.5 – Estados y consumos del transceptor óptico.

Debido a la falta de disponibilidad de datos de consumo de transceptores para VLC, en las simulaciones realizadas se han utilizado valores de consumo correspondientes a un modelo de transceptor empleado en redes de sensores IEEE 802.15.4, tomados de [Chen08]. El uso de estos valores podría limitar la validez de los resultados de consumo de las simulaciones, ya que pueden no ser representativos de los

consumos experimentados en una red VLC. Sin embargo, y de acuerdo a los objetivos de este trabajo, a partir de dichos resultados se podrán establecer comparaciones entre los consumos obtenidos dependiendo de si hay o no nodos ocultos en la red.

En la figura 5.5 se muestran los valores medios de consumo acumulados por el transceptor de cada dispositivo a lo largo del tiempo de simulación. El consumo por dispositivo es mayor en los escenarios con menor número de dispositivos porque la carga ofrecida se distribuye uniformemente entre los dispositivos de la red. De esta forma, para un mismo valor de la carga el número de transmisiones por dispositivo es mayor en los escenarios con menor número de dispositivos.

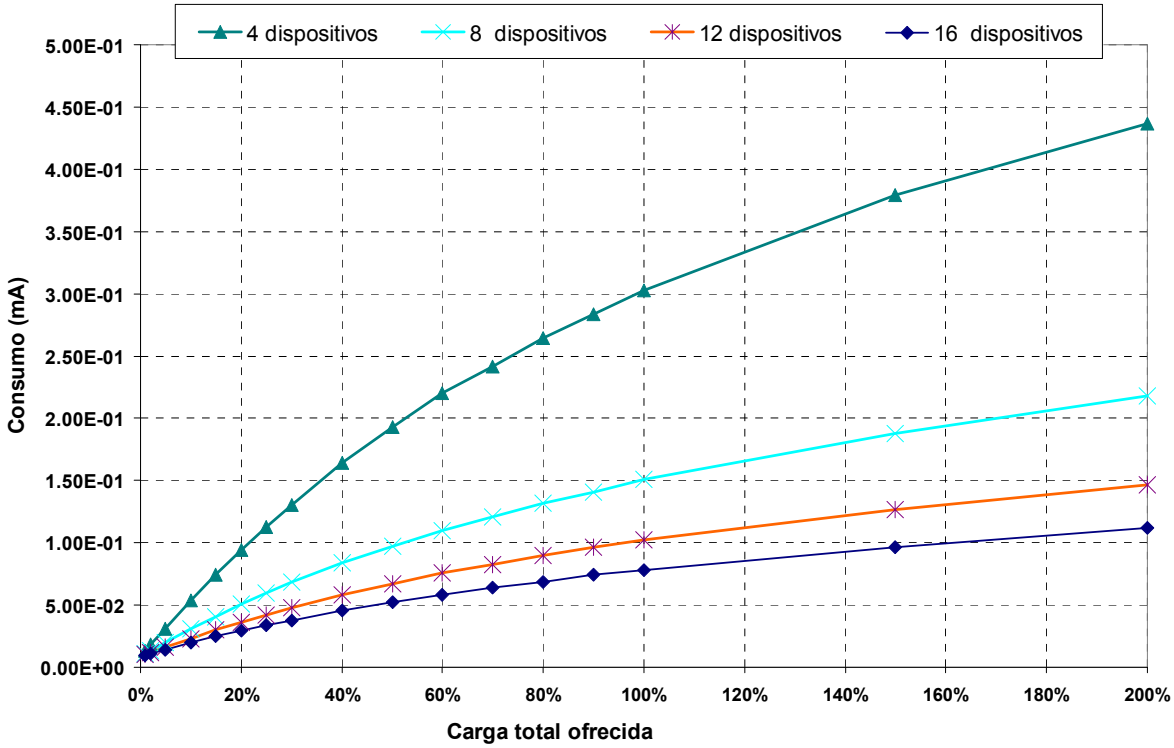


Figura 5.5 – Consumo medio de corriente por dispositivo, sin nodos ocultos.

En la figura 5.5 puede comprobarse que el consumo por dispositivo crece con la carga, pero no de forma lineal con ésta. Como ya se ha indicado, en ausencia de nodos ocultos, a medida que aumenta la carga también lo hace el tiempo que los dispositivos se encuentran realizando esperas de *backoff* y llamadas a la función CCA, situaciones en las que el consumo del transceptor es menor al experimentado cuando se encuentra transmitiendo.

En la figura 5.5 se comprueba que, a medida que aumenta la carga se tiende a una relación de proporcionalidad inversa entre el consumo por dispositivo y el número de dispositivos en cada escenario. Por ejemplo, para una carga del 100% el consumo en el escenario de 4 dispositivos es de $3{,}03 \cdot 10^{-1}$ mA, mientras que en el escenario de 16 dispositivos resulta ser de aproximadamente la cuarta parte, $7{,}80 \cdot 10^{-2}$ mA.

En la figura 5.6 se muestran los valores medios de consumo acumulado por todos los dispositivos de la red. Se observa que a medida que aumenta la carga, los consumos de todos los escenarios tienden a tomar valores similares en orden de magnitud, lo cual está de acuerdo con la proporcionalidad inversa existente entre el consumo por dispositivo y el número de dispositivos de la red.

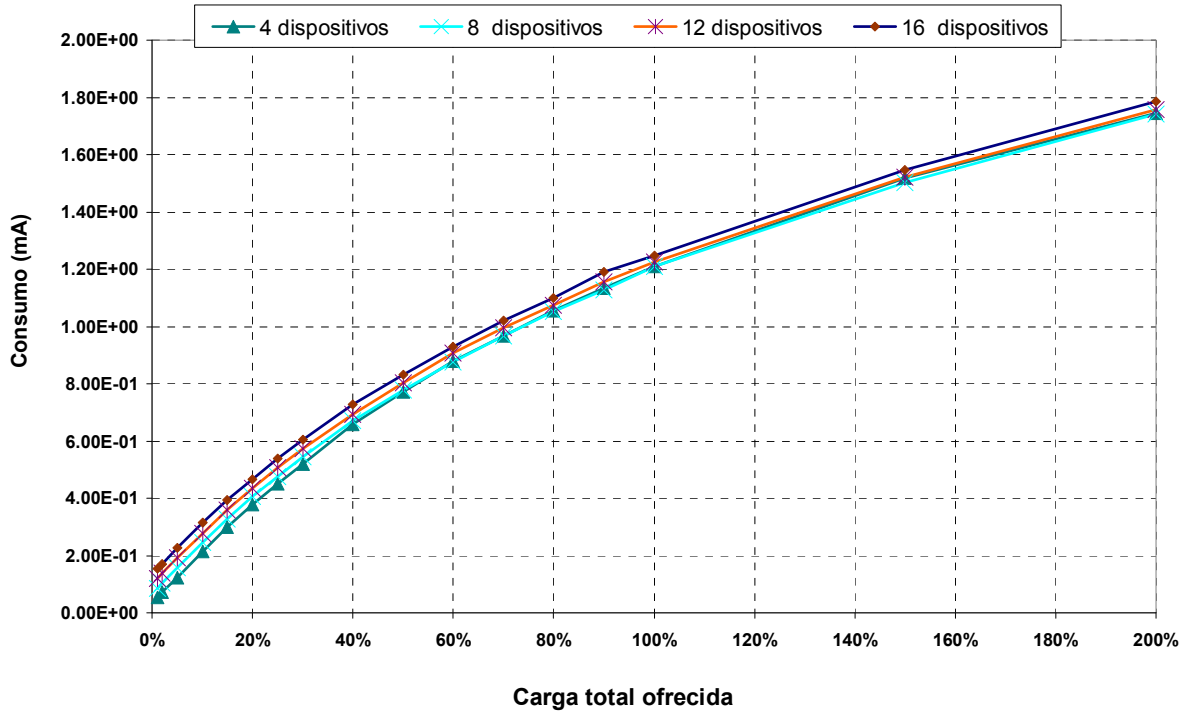


Figura 5.6 – Consumo total acumulado por todos los dispositivos, sin nodos ocultos.

5.2 Prestaciones de las comunicaciones uplink con nodos ocultos

En este apartado se presentan los parámetros de configuración y los resultados de las simulaciones cuando se emplea el modelo de canal óptico en configuración LOS directivo. Tal y como se indicó en el apartado 2.4, debido a la directividad de los transmisores y receptores ópticos y a la limitación de la potencia óptica de transmisión en

los dispositivos móviles, la configuración de enlace LOS directivo da lugar a la aparición de nodos ocultos en la red.

5.2.1 Parámetros y condiciones de simulación

En la tabla 5.6 se presentan los principales parámetros de configuración de la capa PHY, empleados con la configuración de enlace LOS directivo. Se remarcan en negrita los parámetros añadidos o que modifican su valor en relación con los parámetros usados en las simulaciones realizadas sin nodos ocultos.

Parámetro	Valor
Velocidad de Transmisión (MCS-ID 16)	1,25 Mbps
Frecuencia del reloj óptico (MCS-ID 16)	3,75 MHz
Potencia óptica de transmisión del coordinador	1.500 mW
Potencia óptica de transmisión de los dispositivos	**30 mW**
Angulo de potencia mitad $\theta_{1/2}$	**60º**
Campo de visión (FOV)	**60º**
Área del elemento fotodetector (*A*)	1 cm2
Responsividad del fotodetector (*R*)	0,54
Ganancia del concentrador óptico (*G*)	15
Coeficiente de transmisión del filtro óptico (*T*)	1
Duración de la función CCA	8 ciclos de reloj
aTurnaroundTime-TX-RX	0 ciclos de reloj
aTurnaroundTime-RX-TX	8 ciclos de reloj

Tabla 5.6 –Parámetros de configuración de la capa PHY cuando hay nodos ocultos.

Según el modelo de canal óptico presentado en el apartado 2.3.3, la directividad de los transmisores queda caracterizada por su ángulo de potencia mitad, $\theta_{1/2}$, mientras que en los receptores queda definida por su campo de visón, FOV. A ambos parámetros se les ha asignado un valor de 60º, de acuerdo a [Komine04], con el fin de garantizar la validez del modelo de canal implementado, en el que el cálculo de la potencia óptica recibida se realiza considerando únicamente la componente directa de la señal entre transmisor y receptor.

Para la potencia óptica de transmisión de los dispositivos se ha usado un valor de 30 mW, acorde con las limitaciones de consumo impuestas en los terminales móviles alimentados por baterías. Con el fin de simplificar el proceso de cálculo del modelo, los valores de la ganancia del concentrador (G) y el coeficiente de transmisión del filtro óptico (T) se han considerado constantes, no teniéndose en cuenta la dependencia que tienen con el ángulo de incidencia (ψ) con que la señal óptica llega al receptor.

En cualquier caso, los valores seleccionados para los parámetros de configuración de la capa PHY son conformes con los empleados para caracterizar los transmisores y receptores en redes VLC con configuración de canal LOS directivo, y se ajustan a los utilizados en trabajos que emplean dicho modelo de canal, como [Deqiang07], [Komine03] y [Tronghop12].

Empleando la configuración descrita, se comprobó que en los cuatro escenarios de simulación – con 4, 8, 12 y 16 dispositivos – únicamente es posible establecer la comunicación entre cada dispositivo y el coordinador. Ninguno de los dispositivos de la red es capaz de detectar la transmisión de ningún otro, a causa de la directividad de los transmisores y receptores ópticos, y la limitada potencia de transmisión de los dispositivos. Se puede concluir entonces que en redes VLC con topología en estrella y configuración de canal LOS directivo todos los dispositivos de la red son nodos ocultos entre sí.

Para el resto de parámetros de configuración de la capa MAC, la cola Ifq, y la capa de aplicación, se mantienen los mismos valores usados en las simulaciones que se realizaron para evaluar las prestaciones de la red con tráfico no saturado y sin presencia de nodos ocultos.

5.2.2 Resultados de simulación con tráfico no saturado

En este apartado se presentan los resultados de las simulaciones realizadas con la red en condición de tráfico no saturado y con la configuración de canal LOS directivo. Los resultados se presentan haciendo uso de las mismas métricas empleadas en el apartado 5.1.8. El análisis de los resultados de las simulaciones realizadas con nodos ocultos y su comparación con los resultados obtenidos sin ellos permitirá demostrar el efecto que dichos nodos tienen sobre las prestaciones de la red.

Goodput y tasa de pérdida de paquetes

En la figura 5.1 se representan los valores de *goodput* obtenidos para los cuatro escenarios en función de la carga total ofrecida sobre la red. En dicha figura puede observarse que el *goodput* máximo no alcanza el 20% de la velocidad de transmisión en ninguno de los escenarios, valor que queda muy por debajo del máximo *goodput* conseguido cuando no existen nodos ocultos en la red (entre el 65% y el 72%). También puede observarse cómo el *goodput* comienza a descender de forma abrupta a partir de valores de cargas mayores al 30% – a causa del creciente número de colisiones – hasta alcanzar un valor prácticamente igual al 0%.

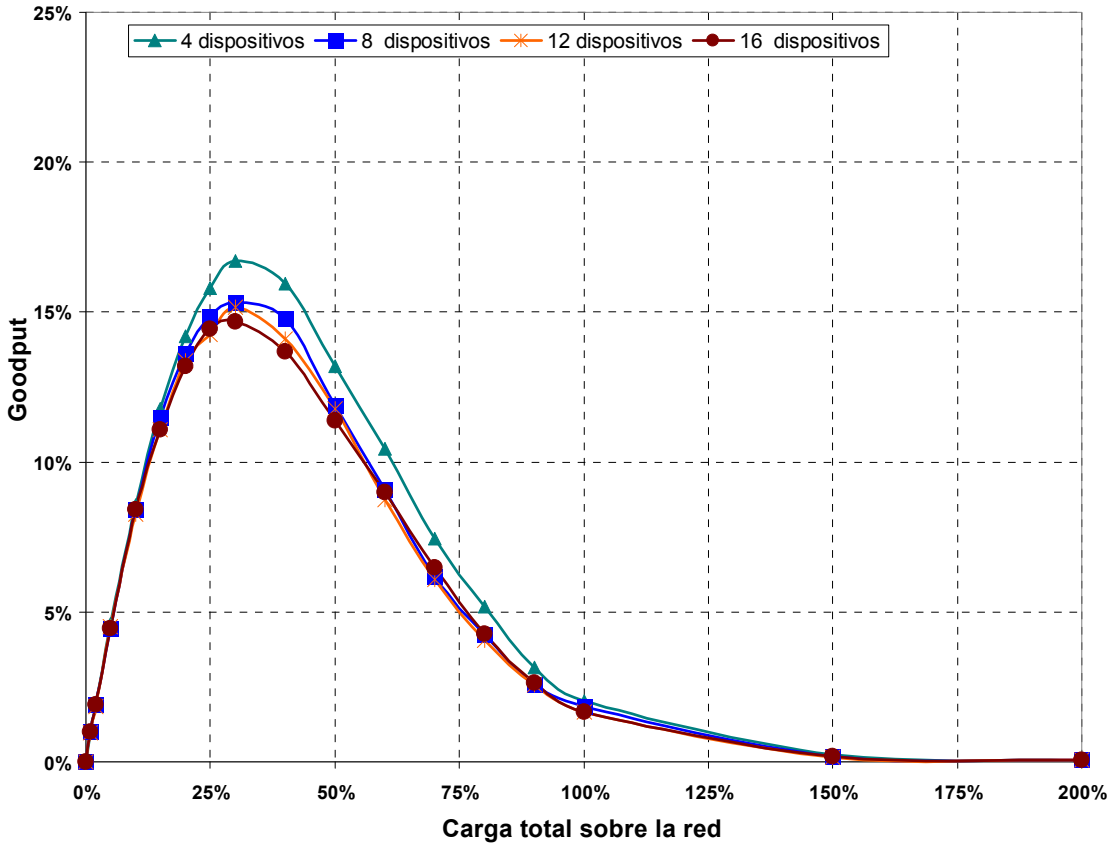


Figura 5.7 - *Goodput* en función de la carga total sobre la red, con nodos ocultos.

Los resultados de *goodput* obtenidos se ven confirmados con los valores de la tasa de pérdida de paquetes presentados en la figura 5.8, donde se observa cómo ésta aumenta rápidamente con la carga, en comparación con los resultados obtenidos cuando no existen nodos ocultos en la red. Comparando las gráficas del *goodput* de la figura 5.7 y de tasa de

pérdida de paquetes de la figura 5.8, se puede comprobar que para valores de carga superiores al 150% el *goodput* es prácticamente nulo y la tasa de pérdida de paquetes es casi el 100%.

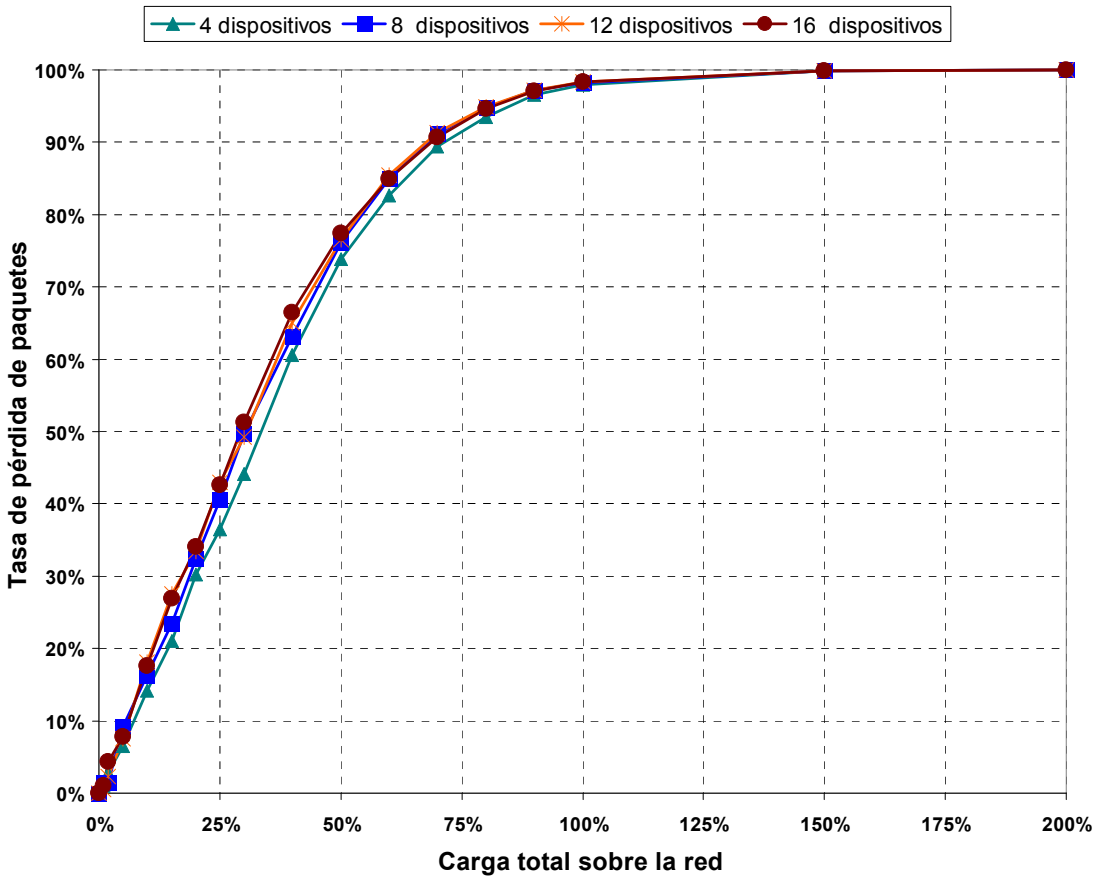


Figura 5.8 - Tasa de pérdida de paquetes, con nodos ocultos.

Con el fin de visualizar la magnitud de la degradación de las prestaciones de la red a causa de la aparición de los nodos ocultos, en las figuras 5.9 y 5.10 se muestra la comparación de los valores obtenidos para el *goodput* y la tasa de pérdida de paquetes en los escenarios con 4 y 16 dispositivos, para el caso en que no hay nodos ocultos - caso (1) - y en el que sí hay nodos ocultos en la red - caso (2).

En las figuras 5.9 y 5.10 resultan evidentes las notables diferencias entre los valores de *goodput* y tasa de pérdida de paquetes obtenidos para ambos casos, demostrándose además que la degradación de las prestaciones se hace más pronunciada a medida que aumenta la carga ofrecida sobre la red.

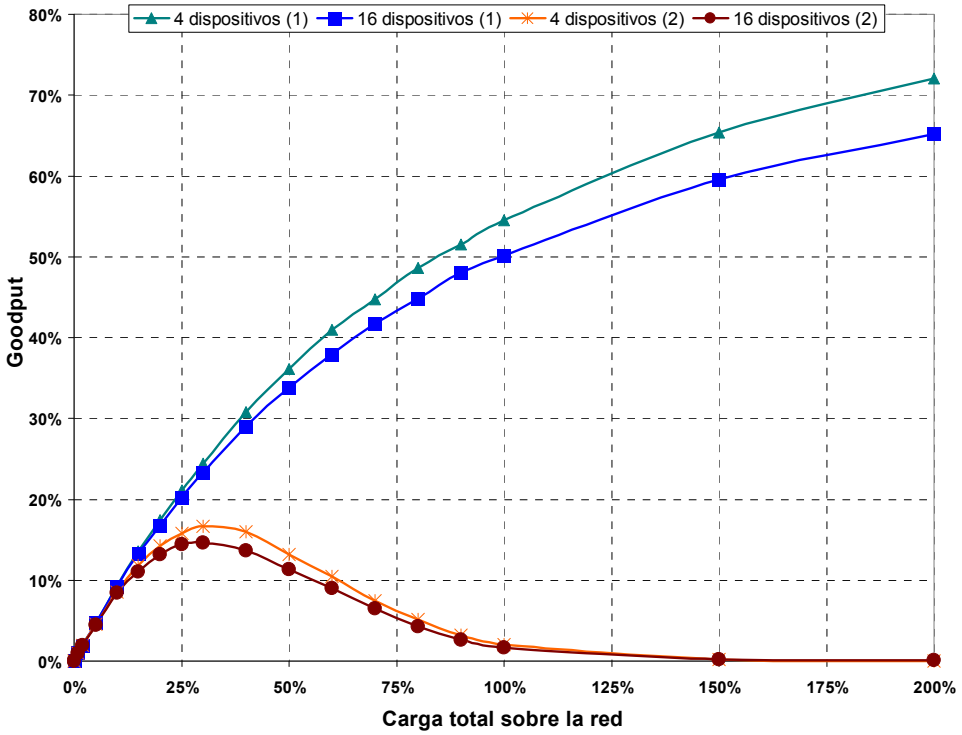


Figura 5.9 –*Goodput* en ausencia (1) y presencia (2) de nodos ocultos.

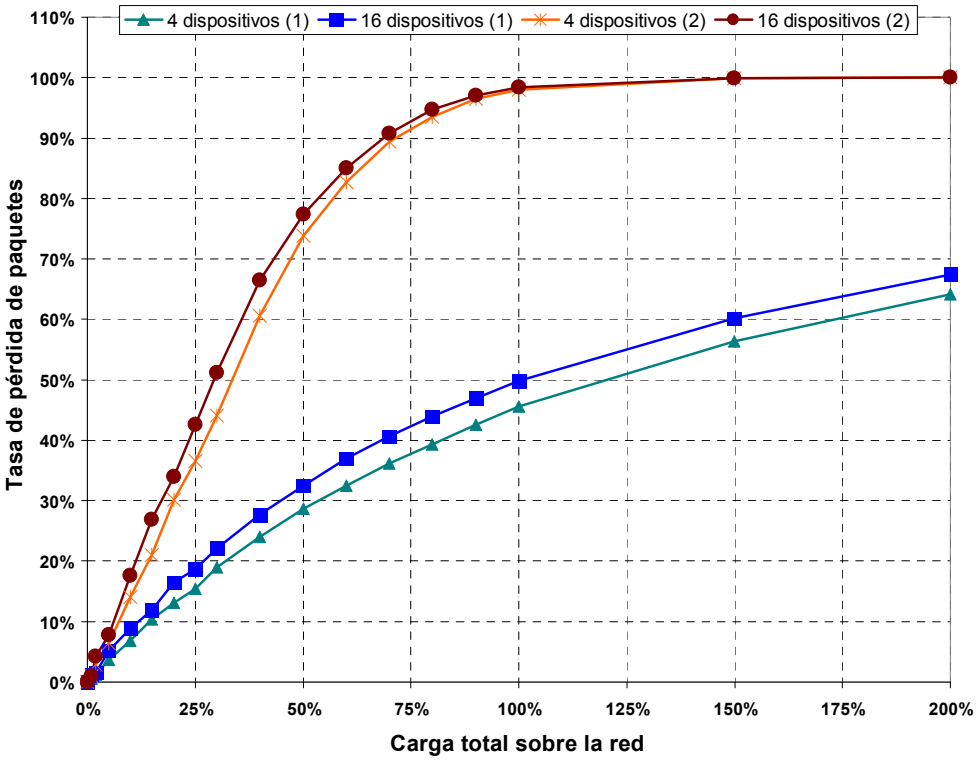


Figura 5.10 - Tasa de pérdida de paquetes en ausencia (1) y presencia (2) de nodos ocultos.

Estadísticas del CSMA/CA

La tabla 5.7 muestra los resultados de las estadísticas obtenidas del CSMA/CA para los escenarios de 4 y 16 dispositivos, y los valores de carga seleccionados del 10%, 50% y 200%. Los valores mostrados se han calculado promediando los resultados obtenidos en todos los dispositivos de cada escenario. Los porcentajes de las columnas de tramas transmitidas con éxito, de fallos de acceso al canal y de fallos de transmisión de trama están calculados sobre el total de las tramas de datos que la capa MAC intenta transmitir. El porcentaje de colisiones está calculado sobre el total de transmisiones de tramas de datos realizadas por la capa MAC.

N **(numero de dispositivos)**	**Carga total ofrecida**	**Tramas transmitidas con éxito**	**Fallos de acceso al canal**	**Fallos de transmisión de trama**	**Colisiones**
4	**10%**	85,9%	0%	14,1%	41%
	50%	28,61%	0,03%	71,36%	91,2%
	200%	0.1%	0%	99,9%	99,9%
16	**10%**	82%	0%	18%	0.8%
	50%	22,73%	0.02%	77,25%	93,3%
	200%	0,02%	0%	99,98%	99,9%

Tabla 5.7 - Estadísticas obtenidas del CSMA/CA, con nodos ocultos.

Al igual que sucede con las estadísticas obtenidas cuando no hay nodos ocultos en la red (véase la tabla 5.4), el porcentaje de tramas transmitidas con éxito disminuye a medida que aumenta la carga y el número de nodos en la red. Sin embargo, en presencia de nodos ocultos es mucho más pronunciada la disminución del porcentaje de tramas transmitidas con éxito, llegando a ser prácticamente el 0% con una carga del 200% en todos los escenarios. La acusada disminución de las tramas transmitidas con éxito se debe al rápido incremento del número de colisiones, cuyo porcentaje resulta ser superior al 90% para cargas mayores al 50%.

Debido al elevado porcentaje de colisiones, la práctica totalidad de los fallos producidos en el algoritmo CSMA/CA aparecen contabilizados en la columna de fallos de transmisión de trama, producidos cuando se excede el límite máximo de

retransmisiones (*macMaxFrameRetries*), lo que supone una clara diferencia con las estadísticas obtenidas cuando no hay nodos ocultos, donde todos los fallos producidos en el algoritmo CSMA/CA están contabilizados en la columna de fallos de acceso al canal, producidos cuando se excede el límite *macMaxCSMABackoffs*.

Tiempos de transacciones CSMA/CA

En la figura 5.11 se representan los valores de los tiempos medios de las transacciones CSMA/CA terminadas con éxito, en función de la carga total ofrecida sobre la red. Los tiempos presentados en la figura 5.11 son los promedios de los valores obtenidos de todos los dispositivos. En dicha figura puede observarse que los tiempos de las transacciones aumentan con el número de dispositivos en la red, al ser necesarias más retransmisiones de tramas a causa del mayor número de colisiones existentes en los escenarios con más dispositivos.

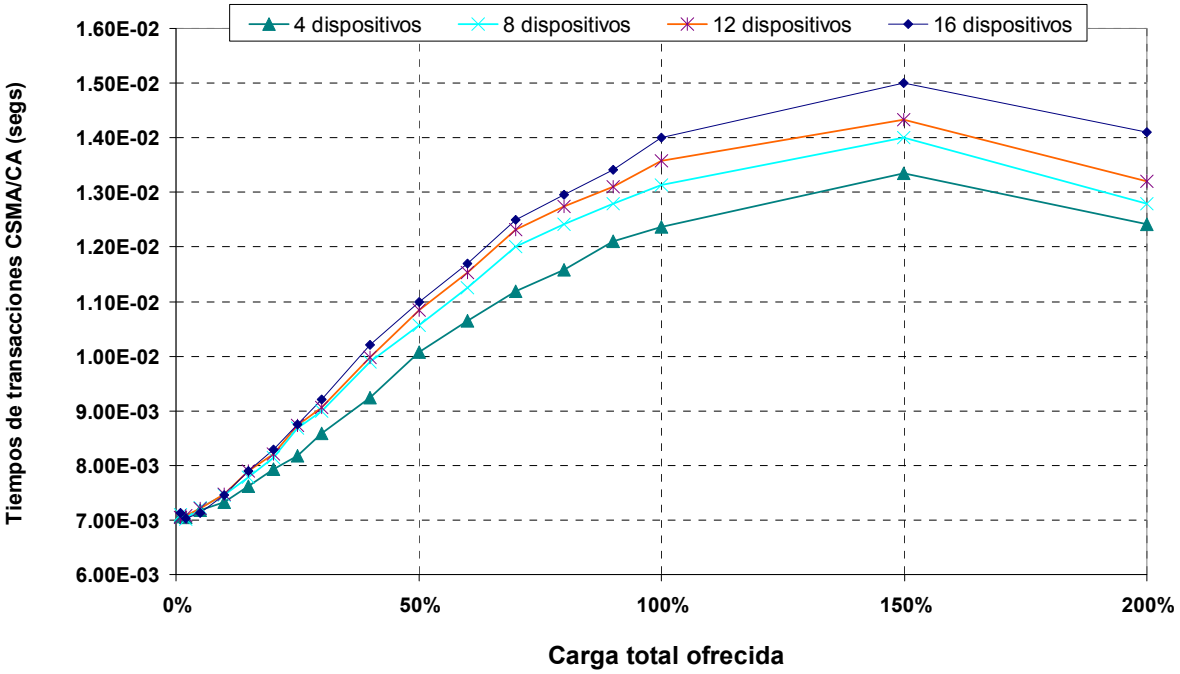


Figura 5.11 - Tiempos de transacciones CSMA/CA terminadas con éxito, con nodos ocultos.

En la figura 5.11 se observa también que los tiempos de las transacciones terminadas con éxito experimentan un incremento notable con la carga, siempre que ésta no sobrepase el 150%. Para valores de carga mayores al 150% se produce una inversión

en dicha tendencia, debido al bajo número de de transacciones que terminan con éxito y al hecho de que una parte importante de las mismas termina tras haberse realizado un menor número de retransmisiones.

Comparando los tiempos de las transacciones terminadas con éxito cuando hay nodos ocultos, en la figura 5.11, con los tiempos obtenidos sin nodos ocultos, en la figura 5.3, se comprueba que con nodos ocultos el aumento de dichos tiempos con la carga es mucho más pronunciado, por el incremento en el número de retransmisiones de tramas que hay que realizar a causa de las colisiones.

En la figura 5.12 se representan los tiempos medios de las transacciones terminadas con fallo. Los resultados de las simulaciones mostrados en la figura indican que en todos los escenarios los tiempos de las transacciones fallidas se mantienen muy próximos al valor:

$$t_{fallo} = 2{,}83 \cdot 10^{-2} \text{ seg.} \tag{5.8}$$

Teniendo en cuenta el valor del tiempo necesario para realizar la transmisión de una trama y su correspondiente confirmación $t_{trama+ack}$, indicado en la expresión (5.7), el tiempo necesario para realizar 4 transmisiones de tramas y sus respectivas confirmaciones resultará:

$$t_{4trama+ack} = 4 \cdot t_{trama+ack} = 4 \cdot 6{,}81 \cdot 10^{-3} = 2{,}72 \cdot 10^{-2} \text{ segs.} \tag{5.9}$$

Este valor de tiempo obtenido, $t_{4trama+ack}$, sumado a los tiempos necesarios para realizar los *backoffs*, los alineamientos con los *slots* de la supertrama, y las llamadas a la función CCA, resulta en un orden de magnitud similar al tiempo de las transacciones fallidas, t_{fallo}, indicado en (5.8). De esta forma, se puede afirmar que, en promedio, las transacciones fallidas terminan después de haberse realizado 4 transmisiones de tramas, al verse sobrepasado el límite máximo de reintentos de transmisión dado por el atributo *macMaxFrameRetries*, cuyo valor se ha fijado a 3 reintentos.

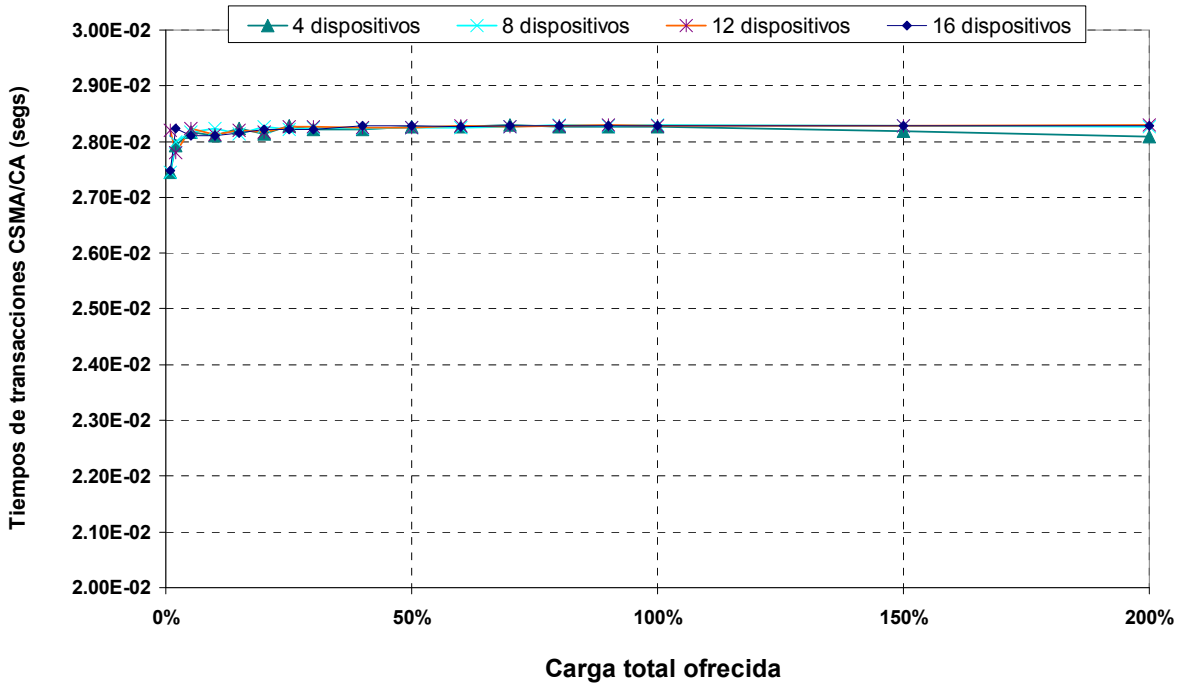


Figura 5.12 - Tiempos de transacciones CSMA/CA terminadas con fallo, con nodos ocultos.

Consumo de energía

En la figura 5.13 se muestran el consumo medio de corriente del transceptor de cada dispositivo en función de la carga ofrecida. En comparación con los valores de consumo obtenidos cuando no hay nodos ocultos (véase la figura 5.5), los consumos con nodos ocultos se mantienen en valores superiores en la práctica totalidad de los valores de carga y en todos los escenarios.

Comparando los consumos obtenidos cuando hay nodos ocultos, presentados en la figura 5.13, con los obtenidos sin nodos ocultos, en la figura 5.5, se comprueba que las diferencias existentes entre ellos se hacen más notables a medida que aumenta la carga. El mayor incremento en los consumos con nodos ocultos se debe al aumento en el número de retransmisiones de tramas que hay que realizar, causa de las colisiones producidas en la red.

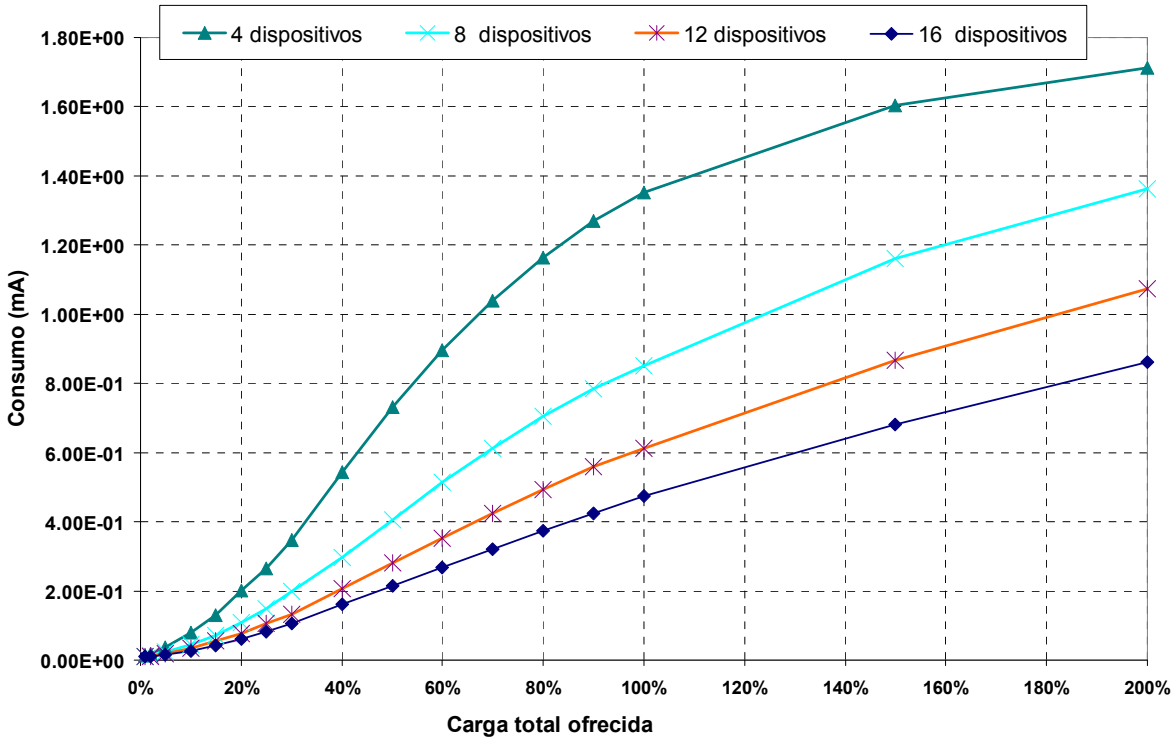


Figura 5.13 - Consumo medio de corriente por dispositivo, con nodos ocultos.

Las diferencias entre los consumos obtenidos en ausencia y presencia de nodos ocultos quedan más patentes si se emplea como indicador el consumo total de corriente por byte de carga útil (byte de la MSDU) transferido en la red; es decir, la corriente que ha de ser consumida por todos los dispositivos de la red para recibir con éxito en el coordinador un byte de los paquetes de la capa de aplicación.

En la tabla 5.8 se muestran los resultados de consumo de corriente por byte, para los escenarios de 4 y 16 dispositivos y para los valores de carga del 50%, 100% y 200%. Los valores de la tabla 5.8 muestran que a medida que aumenta la carga ofrecida hay un incremento de los consumos por byte en ambos escenarios, tanto en ausencia como en presencia de nodos ocultos. No obstante, puede observarse que en presencia de nodos ocultos y con cargas mayores al 100%, los consumos por byte alcanzan valores superiores en varios órdenes de magnitud a los consumos obtenidos sin nodos ocultos.

N **(numero de dispositivos)**	**Carga total ofrecida**	**Consumo sin nodos ocultos (mA/byte)**	**Consumo con nodos ocultos (mA/byte)**
4	**50%**	$3{,}42 \cdot 10^{-8}$	$3{,}57 \cdot 10^{-7}$
	100%	$3{,}57 \cdot 10^{-8}$	$4{,}28 \cdot 10^{-6}$
	200%	$3{,}89 \cdot 10^{-8}$	$2{,}48 \cdot 10^{-4}$
16	**50%**	$3{,}96 \cdot 10^{-8}$	$4{,}87 \cdot 10^{-7}$
	100%	$3{,}99 \cdot 10^{-8}$	$7{,}37 \cdot 10^{-6}$
	200%	$4{,}39 \cdot 10^{-8}$	$4{,}49 \cdot 10^{-4}$

Tabla 5.8 – Comparativa de consumos de corriente por byte de carga útil.

Cuando hay nodos ocultos en la red el incremento en el número de colisiones ocasionado por el aumento de la carga tiene un doble efecto en los consumos de corriente por byte. Por un lado se incrementa notablemente el consumo de corriente en cada dispositivo, como se muestra en la figura 5.13, y por otro disminuye drásticamente el número de paquetes recibidos en el coordinador, como puede comprobarse con los valores de tasa de pérdida de paquetes mostrados en la figura 5.8.

6. Propuesta de solución al problema del nodo oculto

En este capítulo se presenta una propuesta de solución para resolver el problema del nodo oculto en las comunicaciones *uplink* realizadas durante el periodo de acceso con contención de la supertrama, en el estándar IEEE 802.15.7.

Se comienza evaluando varias de las soluciones existentes a dicho problema, analizándose su efectividad para resolver el problema planteado en las redes IEEE 802.15.7 con configuración de canal LOS directivo. Seguidamente se describe la solución propuesta, y su implementación en el modelo de simulación realizado para esta tesis. Finalmente, se presentan y analizan los resultados de las simulaciones realizadas con la solución diseñada.

6.1 Antecedentes

Como se indicó en el apartado 2.4, el problema del nodo oculto es un problema bien conocido y estudiado en las redes inalámbricas basadas en radio frecuencia, y sus efectos han sido ampliamente evaluados en multitud de trabajos, entre los cuales se encuentran los reseñados [Yang09] [Ekici08] y [Jang12] para redes IEEE 802.11, así como [Harthikote-Matha07] y [Wijetunge11] para redes IEEE802.15.4.

Para las redes basadas en radio frecuencia se han propuesto diversas alternativas como solución al problema del nodo oculto, entre las que se pueden destacar las siguientes:

- En cuanto al estándar IEEE 802.11, al protocolo de la capa MAC se le ha añadido la posibilidad de utilizar las tramas RTS (*Request to Send*) y CTS (*Clear to Send*), siguiendo el procedimiento fijado en el protocolo MACAW (*Multiple Access with Collision Avoidance for Wireless*) propuesto por [Bharghavan94]. Se ha demostrado que el uso de las tramas RTS/CTS reduce los efectos del problema del nodo oculto, aunque su efectividad varía dependiendo de factores como el número de nodos ocultos y el tamaño de trama utilizado [Khurana99] [Hung06].

  Para el estándar IEEE 802.15.4 se han publicado diversos trabajos con propuestas de solución basadas en el uso de las tramas RTS/CTS, como [Duan12] y [Barroca14]. Sin embargo, la efectividad de dicho procedimiento en este tipo de redes ha sido cuestionada por otros autores, como [Hwang05] [Kwon09] y [Sheu09] debido al grado de complejidad añadido, y al hecho de que durante el tiempo de *backoff* no se reciben las tramas RTS/CTS transmitidas por otros nodos, al deshabilitarse la recepción en el transceptor para reducir el consumo de energía[*]. Dadas las similitudes existentes entre las capas MAC de los estándares IEEE 802.15.4 y IEEE 802.15.7, se pueden aplicar a este último las mismas consideraciones en cuanto a la efectividad del uso de las tramas RTS/CTS para resolver el problema del nodo oculto.

- Para las redes IEEE 802.15.4 existen también otras propuestas de solución, como [Kwon09] y [Hwang05], aplicables a las redes con topología en estrella en las que se utiliza la supertrama. El principio general en que se basan estas propuestas es la distribución de los dispositivos de la red en grupos, constituyéndose cada grupo con aquellos dispositivos que detectan mutuamente sus transmisiones, de forma que no hay nodos ocultos entre los dispositivos de un mismo grupo. Una vez formados los grupos, el coordinador evita las colisiones entre los mismos asignando un periodo de tiempo específico de la supertrama a las transmisiones de cada grupo, periodo durante el cual los dispositivos de ese grupo transmiten empleando un algoritmo de acceso al medio con contención.

[*] En en el algoritmo CSMA/CA del estándar IEEE 802.15.4 se desactiva la recepción durante el tiempo de espera del *backoff*, lo que se conoce como *blind backoff*.

El principal inconveniente de estas soluciones es la sobrecarga que supone a la red la formación y el mantenimiento de los grupos, lo que las hace poco efectivas cuando el grado de movilidad de los dispositivos es alto. En las redes IEEE 802.15.7 con configuración de canal LOS directivo se puede ver limitada la efectividad de este tipo de soluciones, ya que - de acuerdo a los resultados de las simulaciones realizadas en esta tesis - es de esperar que la práctica totalidad de los dispositivos de la red sean nodos ocultos entre sí.

- Para las redes IEEE 802.15.4 se han propuesto otras soluciones, como la presentada en [Sheu09], en la que se asignan slots de tiempo en el periodo de acceso sin contención de la supertrama para que puedan repetirse las transmisiones involucradas en colisiones producidas entre nodos ocultos. Los autores de este trabajo demuestran la efectividad de esta solución en un escenario de red en el que la probabilidad de aparición de nodos ocultos es menor al 45%. Sin embargo, la efectividad de esta solución en redes IEEE 802.15.7 con configuración de canal LOS directivo puede verse mermada, al ser prácticamente el 100% de los dispositivos de la red nodos ocultos entre sí.

- En lo referente al estándar IEEE 802.15.7 y las redes VLC, recientemente se han publicado diversos trabajos con propuestas de modelos de comunicación en los que los nodos pueden transmitir y recibir simultáneamente, lo que además de mejorar las prestaciones de la red permite eliminar o reducir en gran parte los efectos del problema del nodo oculto. Como ejemplo, en [Wang15b] y [Zhang15b] se proponen protocolos *full duplex* para la capa MAC que, además de permitir la transmisión y recepción simultánea de tramas, posibilitan que el coordinador pueda avisar a los dispositivos de la red, notificándoles que el canal está ocupado cuando recibe tramas procedentes de uno de los dispositivos.

  En [Wang14] se propone un algoritmo de acceso al medio que permite que los nodos de la red puedan transmitir una trama o un patrón de señalización al mismo tiempo que reciben una trama procedente de otro nodo. De esta forma, los nodos próximos a un nodo receptor cuentan con más probabilidades de detectar las transmisiones que se realizan en la red, reduciéndose en buena parte los efectos del problema del nodo oculto.

Estas propuestas presentan la ventaja de haber sido diseñadas específicamente para redes basadas en el estándar IEEE 802.1.7, y son una solución más efectiva al problema del nodo oculto que las soluciones antes reseñadas para las redes basadas en radio frecuencia. No obstante, presentan el inconveniente de requerir cambios significativos en las especificaciones del estándar.

La propuesta de solución que se plantea en esta tesis es igualmente efectiva para resolver el problema del nodo oculto en las redes IEEE 802.1.7, pero cuenta con la ventaja adicional de no precisar de modificaciones en las especificaciones del estándar actualmente en vigor.

6.2 Propuesta de solución

En esta tesis se propone una solución al problema del nodo oculto basada en el modelo planteado en [Tobagi75] para redes de radiofrecuencia, en las que se emplea el algoritmo de acceso al canal CSCMA y hay un nodo encargado de recibir y centralizar las transmisiones del resto de los nodos. De acuerdo al modelo planteado en [Tobagi75], al recibirse una transmisión en el nodo central, éste emite un tono de señalización - denominado *busy tone* – que es recibido por todos los nodos de la red, y les sirve de aviso para que puedan detectar que hay una transmisión en curso. De acuerdo con los resultados presentados por los autores de esta propuesta, su solución permite obtener valores de prestaciones prácticamente iguales a los conseguidos empleando el método de acceso CSMA cuando en la red no hay nodos ocultos.

La solución planteada en esta tesis se fundamenta en la aplicación del modelo utilizado en [Tobagi75] en las redes IEEE 802.15.7 con topología en estrella, siendo el coordinador el encargado de emitir una señal o patrón – de forma análoga al *busy tone* – para señalizar que se encuentra recibiendo una transmisión procedente de uno de los dispositivos de la red.

6.2.1 Descripción del modelo

Como se indicó en el apartado 3.5.4, el estándar IEEE 802.15.7 establece que el coordinador de la red debe transmitir patrones de inactividad durante los intervalos de tiempo en que está recibiendo datos o no tiene actividad, con el fin de mantener la

visibilidad, garantizar el control de la luminosidad y evitar que haya parpadeo visible al ojo humano.

El estándar da la posibilidad de que los patrones de inactividad puedan ser dentro o fuera de banda, en relación con el espectro de frecuencias de la señal de salida del detector óptico. Los patrones dentro de banda se sitúan en la banda de paso de la señal que puede aceptar el receptor, y pueden ser detectados cuando se invoca la función CCA para comprobar la actividad en el canal. Los patrones fuera de banda quedan fuera de la banda de paso del receptor y no son detectados al invocarse la función CCA.

La solución propuesta en esta tesis se basa en la elección del tipo de patrones de inactividad que emite el coordinador, en función de si recibe o no transmisiones procedentes de los dispositivos de la red, tal y como se indica a continuación:

a. Cuando el coordinador no recibe señal óptica procedente de ningún dispositivo emite los patrones de inactividad fuera de banda. De esta forma, los dispositivos que desean realizar transmisiones *uplink* durante el periodo de acceso con contención detectan el canal disponible cuando invocan la función CCA, durante la ejecución del procedimiento CSMA/CA. En la figura 6.1.a se ilustra un ejemplo de esta situación: el coordinador emite el patrón fuera de banda al no recibir ninguna transmisión, y los dispositivos 1 y 2 detectan el canal libre y disponible para transmitir.

b. Cuando el coordinador recibe transmisiones procedentes de uno o más dispositivos de la red emite los patrones de inactividad dentro de banda. De esta forma, los dispositivos que deseen realizar transmisiones detectarán el canal ocupado al invocar la función CCA. La figura 6.1.b ilustra un ejemplo: el coordinador emite el patrón dentro de banda al recibir la transmisión del dispositivo 1, y el dispositivo 2 detecta el canal ocupado.

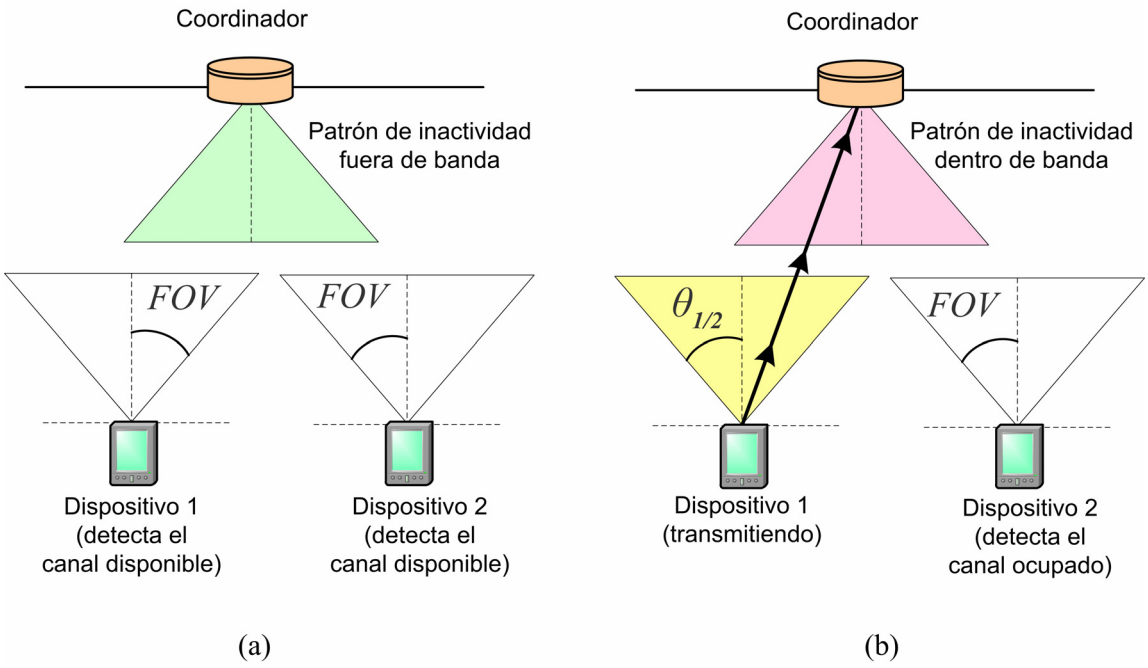


Figura 6.1 – Uso de patrones de inactividad fuera de banda (a) y dentro de banda (b) como mecanismo de señalización en el coordinador.

La solución propuesta presenta la ventaja de no requerir modificaciones en las especificaciones que el estándar IEEE 802.15.7 fija para las características de las capas PHY y MAC de los dispositivos y el coordinador:

- En cuanto al coordinador, el estándar establece que éste debe ser capaz de transmitir los patrones de inactividad al mismo tiempo que recibe las tramas procedentes de los dispositivos, gracias a la separación espacial existente entre el componente transmisor (LED) y receptor (foto detector) de los transceptores ópticos.
- En los dispositivos no es necesaria tampoco ninguna modificación, manteniendo su validez el método CSMA/CA usado para realizar las transmisiones *uplink* en el periodo de acceso con contención de la supertrama.

No obstante, y de acuerdo con los resultados publicados en algunos trabajos, como [Lin09], la transmisión simultánea de señales ópticas en ambos sentidos (patrones de inactividad en sentido *downlink* y tramas en sentido *uplink*) puede dar lugar a interferencias mutuas entre las señales transmitidas. Por ello, con el fin de minimizar dichas interferencias es necesario configurar la capa PHY del coordinador y los

dispositivos con diferentes bandas de longitud de onda (*Channel Numbers*) para cada sentido de transmisión.

La solución propuesta se ha incorporado al modelo de simulación implementado, dotando a la capa PHY del coordinador de la capacidad de seleccionar el tipo de patrones de inactividad que puede emitir, dependiendo de si recibe o no transmisiones procedentes de los dispositivos. De esta forma, con el comienzo de cada nueva trama que se recibe en la capa PHY del coordinador, éste activa la emisión de su patrón de inactividad dentro de banda, el cual es detectado por los dispositivos cuando invocan la función CCA para comprobar el estado del canal. Al finalizar la recepción de las tramas, la capa PHY del coordinador pasa a emitir su patrón de inactividad fuera de banda, con lo que los dispositivos detectan el canal disponible para transmitir.

6.2.2 Condiciones y resultados de simulación

Para comprobar la efectividad de la solución propuesta con el modelo de simulación implementado se han realizado simulaciones para los cuatro escenarios diseñados (de 4, 8, 12 y 16 dispositivos), empleando el modelo de canal LOS directivo y manteniendo las condiciones de simulación utilizadas en el apartado 5.2.1 para evaluar las prestaciones de la red cuando hay nodos ocultos.

Los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas con la solución propuesta son idénticos a los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas sin nodos ocultos (presentados en el apartado 5.1.8), para los cuatro escenarios y la práctica totalidad de los valores de carga simulados. Como confirmación de dichos resultados, a continuación se muestran las gráficas con los valores del *goodput* y la tasa de pérdida de paquetes obtenidos con la solución propuesta. Los resultados para las restantes métricas analizadas son también los mismos que los obtenidos de las simulaciones realizadas sin nodos ocultos.

Goodput y tasa de pérdida de paquetes

En la figura 6.2 se representan los valores de *goodput* obtenidos para los cuatro escenarios en función de la carga total ofrecida sobre la red. Como ya se ha indicado, coinciden con los valores de *goodput* obtenidos de las simulaciones realizadas sin nodos ocultos.

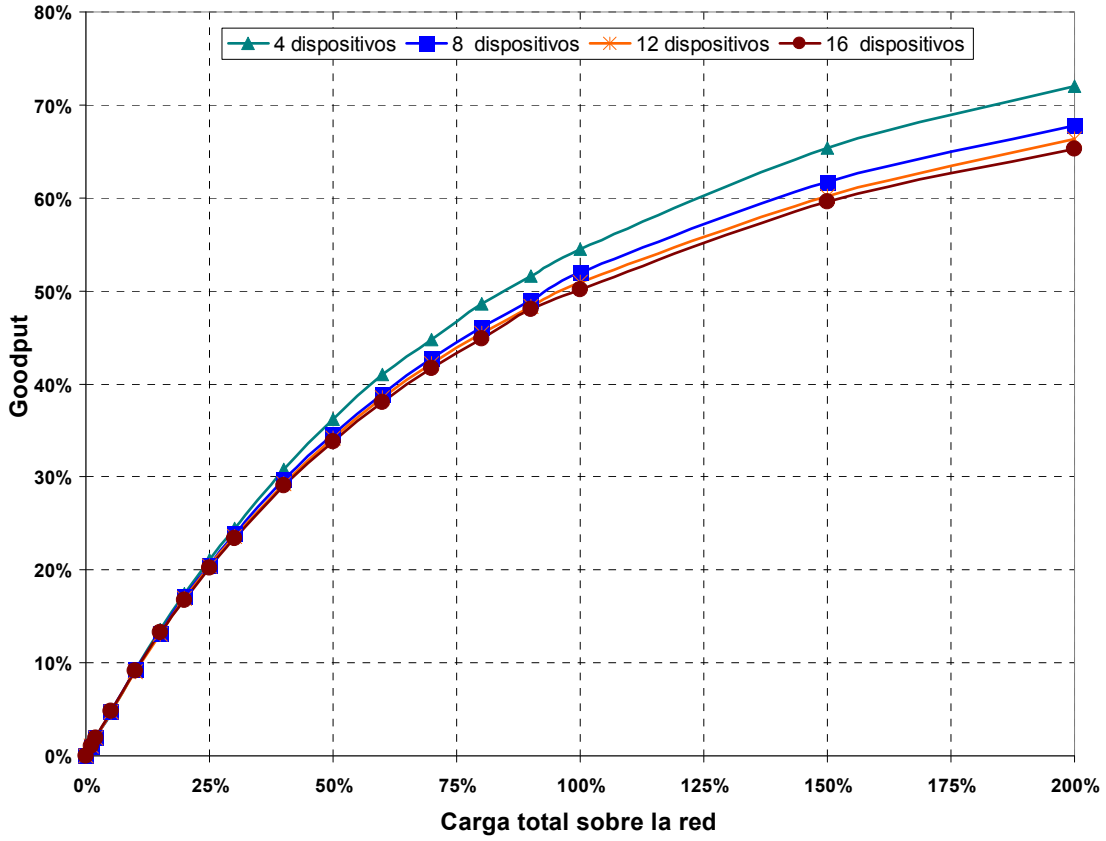


Figura 6.2 - Resultados de *goodput* obtenidos con la solución propuesta.

En la figura 6.3 se representan los valores de tasa de pérdida de paquetes obtenidos en función de la carga ofrecida sobre la red. Los valores coinciden con los obtenidos de las simulaciones realizadas sin nodos ocultos.

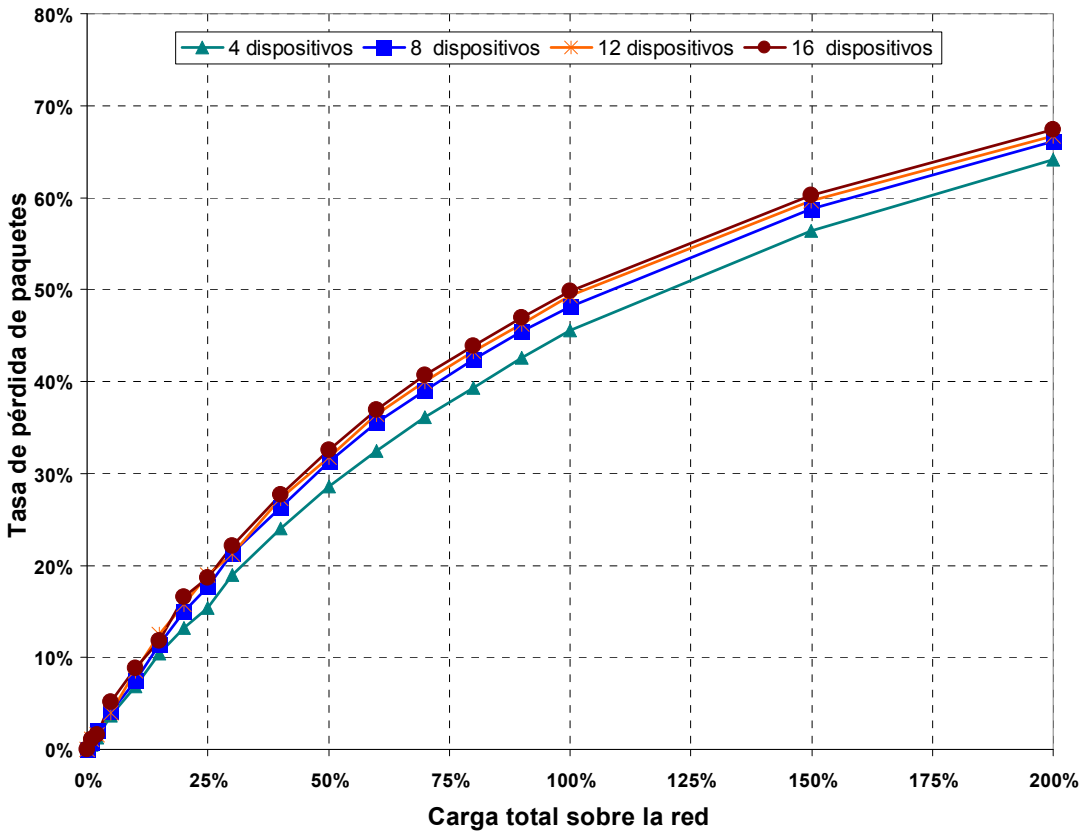


Figura 6.3 – Resultados de tasa de pérdida de paquetes obtenidos con la solución propuesta.

Los resultados de *goodput* y tasa de pérdida de paquetes presentados en las figuras 6.2 y 6.3 han sido obtenidos descartando la posibilidad de que en el coordinador se experimente un retardo en el tiempo necesario para cambiar entre uno y otro tipo de patrones de inactividad. Es decir, en las simulaciones realizadas, tan pronto como comienza a recibirse una trama en la capa PHY del coordinador, se activa la emisión del patrón de inactividad dentro de banda, y tan pronto como termina la recepción, se activa la emisión del patrón de inactividad fuera de banda. Los únicos retardos que afectan a los patrones de inactividad que son recibidos por los dispositivos se deben a los tiempos de propagación de la señal óptica en el recinto simulado.

El estándar IEEE 802.15.7 no establece especificaciones relativas a los tiempos que puedan ser necesarios para la activación y desactivación de los patrones de inactividad, ni tampoco para los tiempos que puedan requerirse para cambiar el tipo de patrón de inactividad. No obstante, se consideró de interés realizar simulaciones para estudiar los efectos que sobre las prestaciones de la red puede tener un retardo de

tiempo introducido entre el comienzo/terminación de la recepción de tramas y el cambio del tipo de patrón de inactividad en el coordinador.

En la figura 6.4 se muestra la comparación de los valores obtenidos para el *goodput* en los escenarios con 4 y 16 dispositivos, para el caso en que no hay retardo al cambiar el tipo de patrón de inactividad - caso (1) - y en el que hay un retardo añadido equivalente a 8 ciclos de reloj - caso (2). El retardo de 8 ciclos de reloj ($2{,}13 \cdot 10^{-6}$ seg.) se ha escogido por ser igual al valor de tiempo configurado para que el transceptor óptico pase del estado de recepción al de transmisión (*aTurnaroundTime-RX-TX*).

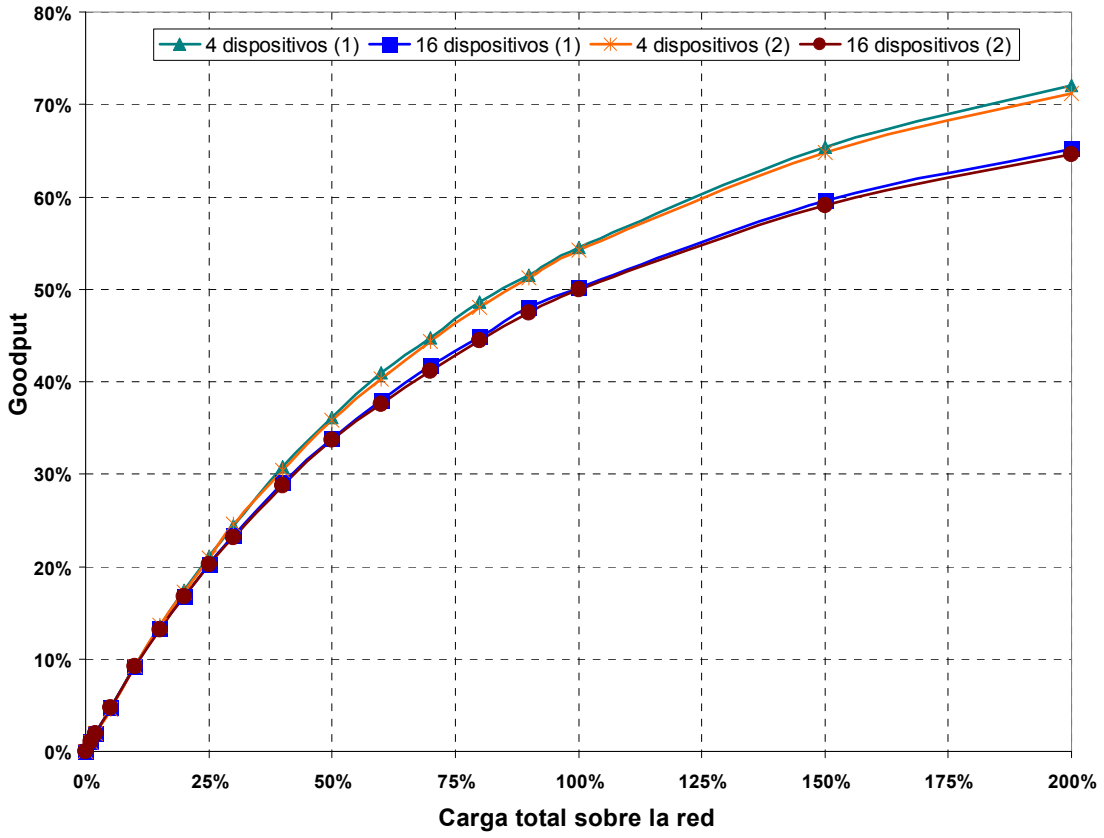


Figura 6.4 - Valores de *goodput* obtenidos con la solución propuesta sin retardo añadido (1) y con retardo añadido (2) al cambiar el tipo de patrón de inactividad.

En la figura se observa una ligera disminución de los valores de *goodput* obtenidos cuando hay retardo añadido, en comparación con los valores obtenidos sin retardo. Se observa también que las diferencias entre dichos valores de *goodput* tienden a aumentar con la carga, pero se mantienen en todos los casos debajo del 2%.

La degradación en las prestaciones de la red con el retardo obedece al desfase añadido entre los tiempos de comienzo/fin de las transmisiones de los dispositivos y los correspondientes tiempos de generación de los patrones dentro/fuera de banda en el coordinador. Este desfase puede traducirse en dos efectos principales:

1. Pueden producirse colisiones adicionales, por detectarse el canal como disponible cuando acaba de comenzar una transmisión, y los dispositivos continúan recibiendo el patrón de inactividad fuera de banda.
2. Puede detectarse el canal ocupado si ya no lo está, cuando acaba de finalizar una transmisión, y los dispositivos continúan recibiendo el patrón de inactividad dentro de banda.

En cualquier caso, y a pesar de los posibles efectos adversos introducidos por los retardos que pudieran existir entre los tiempos de comienzo/terminación de recepción de las tramas y el cambio del tipo de patrón de inactividad, los resultados presentados demuestran el alto grado de efectividad de la solución propuesta para resolver el problema del nodo oculto en las redes basadas en el estándar IEEE 802.15.7.

La solución propuesta cuenta con la ventaja adicional de ser también efectiva en redes IEEE 802.15.7 con configuraciones de enlace que no estén basadas en la configuración de canal LOS directivo.

7. Conclusiones y líneas futuras

En este capítulo se presentan las principales conclusiones de este trabajo de investigación y las líneas futuras de trabajo a seguir.

7.1 Conclusiones

Desde su publicación en 2011, el estándar IEEE 802.15.7 se viene postulando como una de las iniciativas más importantes para normalizar e implantar el uso de las tecnologías VLC en las redes inalámbricas WPAN. Las tecnologías de comunicaciones ópticas no guiadas, además de representar una alternativa viable a los sistemas basados en radio frecuencia, son un firme candidato para satisfacer la demanda de sistemas de acceso inalámbricos con que afrontar el crecimiento del tráfico de datos que se prevé para los próximos años.

La implantación de las redes basadas en el estándar IEEE 802.15.7 debe afrontar varios desafíos tecnológicos, entre los cuales se encuentran las dificultades que presentan las comunicaciones realizadas en sentido *uplink* (desde los dispositivos hacia el coordinador). Entre dichas dificultades hay que destacar las limitaciones que el consumo eléctrico de los diodos LED impone en la potencia de transmisión de los dispositivos móviles, las molestias producidas a los usuarios por las señales luminosas emitidas por los dispositivos, y las limitaciones en la movilidad causadas por la necesidad de mantener una adecuada orientación en los dispositivos.

Adicionalmente, las comunicaciones *uplink* realizadas mediante el método CSMA/CA en el estándar IEEE 802.15.7 se ven afectadas por el problema del nodo

oculto, problema cuyos efectos han sido objeto de estudio en este trabajo de investigación. En esta tesis se han evaluado los efectos de dicho problema mediante simulación, modelándose una red con topología en estrella y configuración de canal LOS directivo. Bajo estas condiciones, se comprobó que en la totalidad de los escenarios modelados todos los dispositivos de la red son nodos ocultos, al no ser ninguno capaz de detectar las transmisiones de los demás.

Los resultados obtenidos de las simulaciones muestran que los efectos del problema del nodo oculto producen una degradación importante en las prestaciones de la red, degradación que se demuestra con los valores obtenidos de las métricas analizadas (*goodput*, tasa de pérdida de paquetes, colisiones, consumo de energía, etc.).

La magnitud de la degradación producida en la red como efecto de los nodos ocultos puede depender de las características específicas de los transmisores y receptores ópticos empleados en los dispositivos. A modo de ejemplo, el uso de transmisores y receptores menos directivos podría reducir en parte los efectos del problema del nodo oculto en redes que utilicen una configuración de enlace difuso. En cualquier caso, las limitaciones en el alcance de la señal óptica - a causa de las restricciones en las potencias de transmisión de los dispositivos – exigen que no puedan ignorarse los efectos del problema del nodo oculto, independientemente de la configuración de enlace utilizada en la red.

En conclusión, el problema del nodo oculto ha de ser incluido como una de las dificultades a resolver en las comunicaciones *uplink* realizadas mediante el método CSMA/CA en las redes IEEE 802.15.7. Por ello, como parte de este trabajo de investigación se ha elaborado una propuesta de solución al problema, que presenta la ventaja de no requerir modificaciones en las especificaciones que el estándar fija para las características de las capas PHY y MAC de los dispositivos y el coordinador.

La solución propuesta en esta tesis se basa en el uso de los patrones de inactividad que deben ser enviados por el coordinador, durante los intervalos de tiempo en que está recibiendo o no tiene actividad, según especifica el estándar. Mediante la selección adecuada del tipo de patrón de inactividad - dentro o fuera de banda - el coordinador puede señalizar si recibe o no transmisiones procedentes de los dispositivos de la red. De esta forma, se garantiza que todas las transmisiones realizadas son

detectadas por la totalidad de los dispositivos, descartándose la posible aparición de nodos ocultos en la red.

Los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas con la solución propuesta han permitido demostrar su alto grado de efectividad, al obtenerse con la misma valores de prestaciones prácticamente iguales a los obtenidos cuando no hay nodos ocultos en la red, lo que permite demostrar la validez de la solución adoptada.

7.2 Líneas futuras de investigación

A continuación se proponen algunas de las líneas de investigación que pueden ser desarrolladas como continuación del trabajo realizado en esta tesis:

- Modelar otras configuraciones de enlace óptico empleadas en las redes VLC, como la configuración de enlace LOS no directivo y la configuración de enlace difuso (*non-LOS*). Para ello, será necesario implementar un modelo de canal que contemple las reflexiones sufridas por la señal óptica en el recinto, y que permita calcular la distorsión producida en la señal a causa de la multipropagación.
- Incorporar la presencia de obstáculos en el recinto simulado, modelando sus efectos en la propagación de la señal óptica en función de la configuración de enlace óptico empleado.
- Estudiar e implementar un modelo de cálculo que permita evaluar la tasa de error de bit a partir de la señal óptica recibida, considerando factores como la configuración del enlace utilizada, las formas de modulación y codificación de línea empleadas (según el estándar IEEE 802.15.7) y el valor de la relación señal a ruido.
- Evaluar las prestaciones de la red en escenarios que incorporen nuevas opciones para la caracterización del tráfico de datos. Por ejemplo, mediante la realización de transmisiones bidireccionales de datos en sentido *uplink* y *downlink*, o haciendo uso de los periodos de acceso con contención y sin contención de la supertrama. Integrar la arquitectura TCP/IP en el modelo de simulación, con el fin de analizar el rendimiento de la red con distintos tipos de tráfico y distintos tipos de aplicaciones.

7.3 Publicaciones derivadas de esta tesis doctoral

Los resultados obtenidos del trabajo de investigación realizado para esta tesis se han publicado en los siguientes artículos, presentados en congresos internacionales:

- "Implementing an IEEE802.15.7 Physical Layer Simulation Model with OMNET++"; 12th International Conference on Distributed Computing and Artificial Intelligence, Volume 373 of the series Advances in Intelligent Systems and Computing, pp. 251 - 258, 2015.
- "Analysis of the Effects of the Hidden Node Problem in IEEE 802.15.7 Uplink Performance"; The 2015 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems, pp. 31 - 15, 2015.

Bibliografía

[Bao14] X. Bao, X. Zhu, T. Song, Y. Ou; "Protocol Design and Capacity Analysis in Hybrid Network of Visible Light Communication and OFDMA Systems"; IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 63, Issue 4, pp. 1770 - 1778, 2014.

[Barroca14] N. Barroca, L. Borges, F. Velez, P. Chatzimisios; "IEEE 802.15.4 MAC layer performance enhancement by employing RTS/CTS combined with packet concatenation"; IEEE International Conference on Communications, pp. 466 – 471, 2014.

[Bhalerao14] M. V. Bhalerao, S. S. Sonavane; "Visible light communication: A smart way towards wireless communication"; International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics, pp. 1370 – 1375, 2014.

[Bharghavan94] V. Bharghavan, A. Demers, S. Shenker, L. Zhang; "MACAW: a media access protocol for wireless LAN's"; Proceedings of the conference on Communications architectures, protocols and applications, ACM, pp. 212-225, 1994.

[Bianchi00] G. Bianchi; "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function"; IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.18, No. 3, pp. 535 - 547, 2000.

[Bianchi98] G. Bianchi; "IEEE 802.11-saturation throughput analysis"; IEEE Communications Letters, Vol.2, No. 12, pp. 318 - 320, 1998.

[Biswal13] S. Biswal, S. Prince ; "Improvement of BER in LED based indoor communication using overlapping pulse position modulation and LDPC coding"; International Conference on Communications and Signal Processing, pp. 34 – 38, 2013.

[Borah12] D. Borah, A. Boucouvalas, C. Davis, S. Hranilovic, K. Yiannopoulos; "A review of communication-oriented optical wireless systems"; EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012.

[Borogovac11] T. Borogovac, M. Rahaim, M. Tuganbayeva, T. Little, "Lights-off visible light communications"; Proc. of 2nd IEEE Globecom 2011 Workshop on Optical Wireless Communications, 2011.

[Boucouvalas15] A. C. Boucouvalas, P.Chatzimisios, Z.Ghassemlooy, M.Uysal, and K.Yiannopoulos; "Standards for indoor optical wireless communications"; IEEE Communications Magazine - Communications Standards Supplement, pp. 24-31, 2015.

[Burton12] A. Burton, H. Le Minh, Z. Ghasemlooy, S. Rajbhandari; "A study of LED lumination uniformity with mobility for visible light communications"; International Workshop on Optical Wireless Communications, pp. 1 - 3, 2012.

[Chen94] K. Chen; "Medium access control of wireless LANs for mobile computing"; IEEE Network, Vol.8, Issue 5, pp. 50 – 63, 1994.

[Chen08] F. Chen, N. Wang, R. German, F. Dressler; "Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 LR-WPAN for Industrial Applications"; Fifth Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services, pp. 89 - 96, 2008.

[Choi12] S. Choi ; "Analysis of VLC channel based on the shapes of white-light LED lighting"; Fourth International Conference on Ubiquitous and Future Networks, pp 1-5, 2012.

[Chvojka15] P. Chvojka, S. Zvanovec, P. A. Haigh, Z. Ghassemlooy; "Channel Characteristics of Visible Light Communications Within Dynamic Indoor Environment"; Journal of Lightwave Technology, Vol.33 , Issue 9, pp. 1719 – 1725, 2015.

[Deqiang07] D. Deqiang; K. Xizheng; X. Linpeng ; "An Optimal Lights Layout Scheme for Visible-Light Communication System"; 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, pp. 2-189 - 2-194, 2007.

[Ding15] J. Ding; Z. Xu; L. Hanzo; "Accuracy of the Point-Source Model of a Multi-LED Array in High-Speed Visible Light Communication Channel Characterization"; Photonics Journal, IEEE, Vol.7, Issue 4, 2015.

[Duan12] J. Duan; Y. Zhuang; L. Ma ; "An adaptive RTS/CTS mechanism in IEEE 802.15.4 for multi-hop networks"; International Conference on Computational Problem-Solving, pp. 155 – 159, 2012.

[Ekici08] O. Ekici, A. Yongacoglu ; "IEEE 802.11a Throughput Performance with Hidden Nodes"; IEEE Communications Letters, Vol.12, Issue 6, 2008.

[Elgala11] H. Elgala, R. Mesleh, H. Hass; "Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art"; IEEE Communications Magazine. pp. 56 - 62, 2011.

[George14] J. George, M. Mustafa, N. Osman, N. Ahmed, D. Hamed; "A Survey on Visible Light Communication"; International Journal Of Engineering And Computer Science, Vol.3 Issue 2, pp. 3805 - 3808, 2014.

[Gfeller79] F.R. Gfeller, U. Bapst; "Wireless in-house data communications via diffuse infrared radiation"; Proceedings of the IEEE, Vol.67, No.11, pp. 1474 - 1486, 1979.

[González05] O. González, S. Rodriguez, R. Perez-Jimenez, B. R. Mendoza, A. Ayala; "Error Analysis of the Simulated Impulse Response on Indoor Wireless Optical Channels Using a Monte Carlo-Based Ray-Tracing Algorithm"; IEEE Transaction on Communications, Vol.53, No.1, pp. 124 - 130, 2005.

[Grobe13] L. Grobe, A. Paraskevopoulos, J. Hilt, D. Schulz; "High-speed visible light communication systems"; IEEE Communications Magazine, Vol.51, Issue 12, pp. 60 - 66, 2013.

[Harthikote-Matha07] M. Harthikote-Matha, T. Banka, A. Jayasumana; "Performance Degradation of IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA due to Hidden Nodes"; IEEE 32nd Conference on Local Computer Networks, pp. 264 - 266, 2007.

[Haitz00] R. Haitz, F. Kish, J. Tsao, J. Nelson; "The Case for a National Research Program on Semiconductor Lighting"; Sandia National Laboratorios, Albuquerque, New Mexico, 2000.

[Hou15] Y. Hou, S. Xiao, H. Zheng; W. Hu; "Multiple access scheme based on block encoding time division multiplexing in an indoor positioning system using visible light"; IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, Vol.7, Issue 5, pp. 489 - 495, 2015.

[Hranilovic05] S. Hranilovic; "Wireless Optical Communications Systems"; Springer; Boston, 2005.

[Hung06] F. Hung, S. Pai, I. Marsic; "Performance Modeling and Analysis of the IEEE 802.11 Distribution Coordination Function in Presence of Hidden Stations"; IEEE Military Communications Conference, pp. 1 – 7, 2006.

[Hwang05] L. Hwang, S. Sep, Y. Shih, Y. Cheng "Grouping strategy for solving hidden node problem in IEEE 802.15.4 LR-WPAN"; First International Conference on Wireless Internet, pp. 26 – 32, 2005.

[Hwang13] J. Hwang, T. Do, M. Yoo; "Performance analysis on MAC protocol based on beacon-enabled visible personal area networks"; Fifth International Conference on Ubiquitous and Future Networks, pp. 384–388, 2013.

[ict-omega11] "OMEGA, the Home Gigabit Access project"; http://www.ict-omega.eu 2011.

[ieee15] "Institute of Electrical and Electronic Engineers"; http://www.ieee.org , 2015.

[ieee80215] "IEEE 802.15 WPANTM 15.7 Revision: Short-Range Optical Wireless Communications Task Group (TG 7r1)"; http://www.ieee802.org/15/pub/IEEE 802_15 WPAN 15_7 Revision1 Task Group.htm, 2015.

[IEEE802.11-1997] "IEEE Standard for Information Technology- Telecommunications and Information Exchange Between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements-Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", pp. i - 445, 1997.

[IEEE802.15.4-2006] "IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems- Local and metropolitan area networks- Specific requirements-Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireles Personal Area Networks (WPANs)", pp. i - 305, 2006.

[IEEE802.15.7-2011] "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication using Visible Light"; pp.1 - 309, 2011.

[IEEE802.2-2013] "IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 2: Logical Link Control"; ISO 8802-2 IEEE 802.2, First Edition 1989-12-31 (Revision of IEEE Std 802.2-1985), pp. 1 - 114, 2013.

[inet15] "INET Framework"; https://inet.omnetpp.org, 2015.

[inetmanet15] "INETMANET Framework"; https://github.com/aarizaq/inetmanet-2.0, 2015.

[isi14] "The Network Simulator - ns-2"; http://www.isi.edu/nsnam/ns/, 2014.

[Jang09] Y. Jang, N. Le, M. Uddin, M. Chowdhury, S. Choi, J. Cha, J. Kim, K. Lee; "Some Considerations for Draft VLC Specification"; https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/15-10-0590-00-0007-some-considerations-for-draft-vlc.pptx, 2009.

[Jang12] B. Jang, M. Sichitiu ; "IEEE 802.11 Saturation Throughput Analysis in the Presence of Hidden Terminals"; IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol.20, Issue 2, pp. 557 – 570, 2012.

[jeita15] "Japan Electronics and Information Technology Industries Association"; http://www.jeita.or.jp , 2015.

[Jovicic13] A. Jovicic, J. Li , T. Richardson; "Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market"; IEEE Communications Magazine, Vol.51 , Issue 12, pp. 26 - 32, 2013.

[Kahn95] J. M. Kahn, W. J. Krause, J. B. Carruthers; "Experimental characterization of nondirected indoor infrared channels"; IEEE Transactions on Communications, vol.43, pp. 1613 - 1623, 1995.

[Kahn97] J. M. Kahn, J. R. Barry; "Wireless Infrared Communications"; Kluwer Academic Publishers, Boston, EEUU, 1994.

[Karunatilaka15] D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally, R. Parthiban; "LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art"; IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.17, Issue 3, pp. 1649 – 1678, 2015.

[Khurana99] S. Khurana, A. Kahol, S. Gupta, P. Srimani; "Performance evaluation of distributed co-ordination function for IEEE 802.11 wireless LAN protocol in presence of mobile and hidden terminals"; Proceedings of 7th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, pp. 40 – 47, 1999.

[Komine03] T. Komine, S. Haruyama, M. Nakagawa; 'Bidirectional visible-light communication using corner cube modulator'. Proceedings of Wireless and Optical Communication, IASTED, 2003.

[Komine04] T. Komine, M. Nakagawa; "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights"; IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol.50, Issue 1, pp. 100 – 107, 2004.

[Kwon09] C. Kwon, R. Tek, K. Kim, S. Yoo; "Dynamic Group Allocation Scheme for avoiding hidden node problem in IEEE 802.15.4"; 9th International Symposium on Communications and Information Technology", pp. 637 - 638, 2009.

[Le10] N.T. Le, M.S. Uddin, S.Choi and Y.M. Jang; "Key Issues for Visible Light WPANs"; OSIA Standards & Technology Review Journal, Vol.23, No.3, pp. 43-56, 2010.

[lificonsortium15] "Li-Fi Consortium"; http://www.lificonsortium.org , 2015.

[Lee11] K. Lee, H. Park, J. R. Barry; "Indoor Channel Characteristics for Visible Light Communications"; IEEE Communications Letters, Vol.15, No.2, pp. 217 - 219, 2011.

[Lin09] K. Lin, K. Hirohashi; "High-Speed Full-Duplex Multiaccess System for Led-based Wireless Communications Using Visible Light"; Proceedings of the International Symposium on Optical Engineering and Photonic Technology, pp. 1 – 5, 2009.

[Lopez-Hernandez97] F. J. Lopez-Hernandez, M. J. Betancor; "DUSTIN: a novel algorithm for the calculation of the impulse response on IR wireless indoor channels"; IEEE Electronics Letters, Vol.33, No. 21, pp. 1804 - 1806, 1997.

[mathworks15] "MATLAB - The Language of Technical Computing"; http://www.mathworks.com/products/matlab/, 2015.

[mixim13] "MiXiM project"; http://mixim.sourceforge.net, 2013.

[mckinsey12] "Lighting the Way: Perspectives on the Global Lighting Market", 2nd ed.; McKinsey & Company; http://www.mckinsey.com, 2012.

[Mondal12] R. Mondal, M. Chowdhury, N. Saha, Y. Jang; "Interference-aware optical resource allocation in visible light communication"; International Conference on ICT Convergence, pp. 155 - 158, 2012.

[Musa13] A. Musa, M. Baba, H. Mansor; "Performance analysis of the IEEE 802.15.7 CSMA/CA algorithm based on discrete time Markov chain (DTMC)"; IEEE Malaysia International Conference on Communications, pp. 385 – 389, 2013.

[Nobar15] S. Nobar, K. Mehr, J. Niya ; "Comprehensive performance analysis of IEEE 802.15.7 CSMA/CA mechanism for saturated traffic"; IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, Vol.7, Issue 2, pp. 62 – 73, 2015.

[Nguyen13] T. Nguyen, M. Chowdhury, Y. Jang; "A novel link switching scheme using pre-scanning and RSS prediction in visible light communication networks"; EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2013.

[O'Brien08] D. O'Brien, L. Zeng, Hoa Le-Minh; G. Faulkner, J. Walewski, S. Randel; "Visible light communications: Challenges and possibilities"; International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008.

[omnetpp15] "OMNeT++ Discrete Event Simulator"; https://omnetpp.org, 2015.

[Pathak15] P. Pathak, X. Feng, P. Hu, P. Mohapatra; "Visible Light Communication, Networking and Sensing: Potential and Challenges"; IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015.

[Perez-Jimenez11] R. Perez-Jimenez, J. Rufo, C. Quintana, J. Rabadan, F. Lopez-Hernandez ; "Visible light communication systems for passenger in-flight data networking"; IEEE International Conference on Consumer Electronics, pp. 445 – 446, 2011.

[Shams15] P. Shams, O. Narmanlioglu, M. Erol-Kantarci, M. Uysal; "Markov-based performance analysis of medium access in visible light communications"; 17th International Conference on Transparent Optical Networks, 2015.

[Rajagopal12] S. Rajagopal, R. Roberts, S. Lim; "IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support"; IEEE Communications Magazine, Vol.50, Issue 3, pp. 72 - 82, 2012.

[Saadi12] M. Saadi, L. Wattisuttikulkij, Y. Zhao, P. Sangwongngam; "Visible Light Communication: Opportunities, Challenges And Channel Models", International Journal of Electronics and Informatics, 2012.

[Sheu09] S. Sheu, Y. Shih, W. Lee; "CSMA/CF Protocol for IEEE 802.15.4 WPANs"; IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.58, Issue 3, pp. 1501 - 1516, 2009.

[Shoreh15] M. Shoreh, A. Fallahpour, J. Salehi; "Design concepts and performance analysis of multicarrier CDMA for indoor visible light communications"; IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, Vol.7, Issue 6, pp. 554 - 562, 2015.

[Sindhubala15] K. Sindhubala, B. Vijayalakshmi; "Design and performance analysis of visible light communication system through simulation"; 2015 International Conference on Computing and Communications Technologies (ICCCT), pp. 215 - 220, 2015.

[Singh13] R. Singh, T. O'Farrell, J. David; "Performance evaluation of IEEE 802.15.7 CSK physical layer"; IEEE Globecom Workshops, pp. 1064 - 1069, 2013.

[ted11] H. Hass; "Wireless data from every light bulb"; http://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb? , 2011.

[Tobagi75] F. Tobagi, L. Kleinrock; "Packet Switching in Radio Channels: Part II--The Hidden Terminal Problem in Carrier Sense Multiple-Access and the Busy-Tone Solution"; IEEE Transactions on Communications, Vol.23, Issue 12, pp. 1417 - 1433, 1975.

[Tronghop12] D. Tronghop, J. Hwang, S.Jung, Y. Shin; more authors "Modeling and analysis of the wireless channel formed by LED angle in visible light communication"; International Conference on Information Networking, pp. 354 – 357, 2012.

[tta15] "Telecommunications Technology Association"; http://www.tta.or.kr , 2015.

[vlcc13] "Visible Light Communication Consortium"; http://www.vlcc.net, 2013.

[vlca15] "Visible Light Communications Association"; http://vlca.net , 2015.

[Yang09] J. Yang, J. Kwon, D. SPNG; "Goodput analysis of a WLAN with hidden nodes under a non-saturated condition"; IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol.8, Issue 5, pp. 2259 – 2264, 2009.

[Wang14] Q. Wang, D. Giustiniano; "Communication Networks of Visible Light Emitting Diodes with Intra-Frame Bidirectional Transmission"; Proceedings of the 10th ACM International on Conference on emerging Networking Experiments and Technologies, pp. 21 – 28, 2014.

[Wang15] C. Wang, L. Wang, X. Chi, S. Liu, W. Shi, J. Deng; "The research of indoor positioning based on visible light communication"; China Communications, Vol.12, Issue 8, pp. 85 - 92, 2015.

[Wang15b] Z. Wang, Y. Liu, Y. Lin, S. Huang; "Full-duplex MAC protocol based on adaptive contention window for visible light communication"; IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, Vol.7, Issue 3, pp. 164 - 171, 2015.

[Wijetunge11] S. Wijetunge, U. Gunawardana, R. Liyanapathirana; "Throughput analysis of IEEE 802.15.4 MAC protocol in the presence of hidden nodes"; 11th International Symposium on Communications and Information Technologies, pp. 303 - 308, 2011.

[Zhang15] T. Zhang, S. Guo, H. Chen, F. Zhong; "Enhancing the bit error rate of indoor visible light communication systems using adaptive channel estimation algorithm"; IET Communications, Vol.9, Issue 4, pp. 501-507, 2015.

[Zhang15b] Z. Zhang; X. Yu; L. Wu; J. Dang; V. Li ; "Performance analysis of full-duplex visible light communication networks"; IEEE International Conference on Communications, pp. 3933 - 3938, 2015.

[Zheng10] Y.Zheng; M.Zhang; "Visible Light Communications-Recent Progresses and Future Outlooks"; Symposium on Photonics and Optoelectronic, pp. 1 - 6, 2010.

[Zhou07] J. Zhou, W. Yan; "Experimental investigation on the performance characteristics of white LEDs used in illumination application"; IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 1436 - 1440, 2007.