

UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL



TESIS DOCTORAL

**CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DE RECEPTORES CON
DIVERSIDAD ANGULAR PARA LA INTERCONEXIÓN DE
SENSORES MEDIANTE ENLACES ÓPTICOS NO
GUIADOS**

Autora:

Beatriz Rodríguez Mendoza

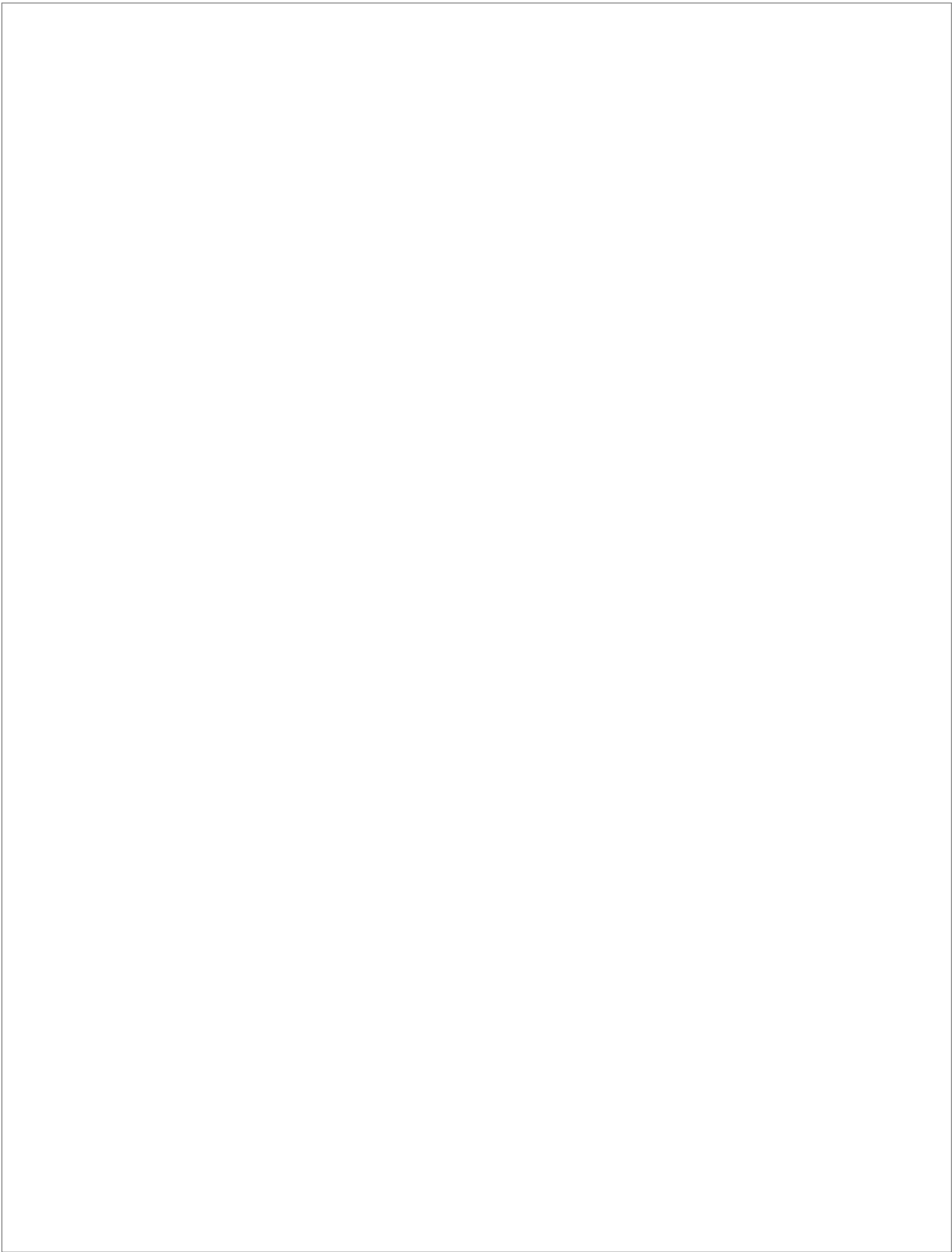
Directores:

Dr. Silvestre Rodríguez Pérez

Dr. Rafael Pérez Jiménez

2017

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
	Identificador del documento: 866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

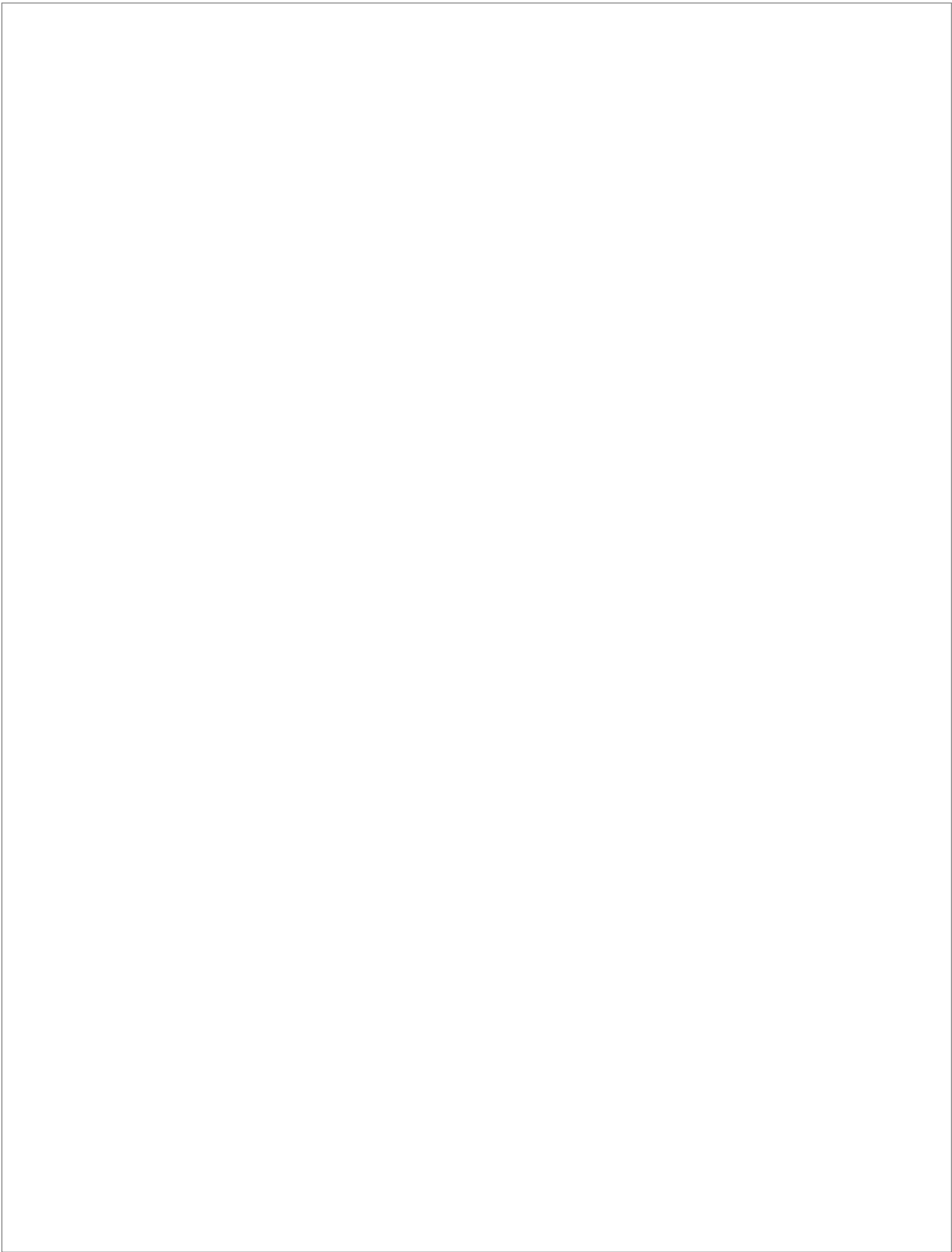


Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 <i>La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion</i>		
	Identificador del documento: 866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i> <i>En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA</i>		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
<i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i> <i>En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ</i>		08/03/2017 02:32:55
<i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i> <i>En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ</i>		08/03/2017 08:31:53
<i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i> <i>En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO</i>		14/03/2017 13:45:07
<i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i> <i>En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO</i>		14/03/2017 21:06:21

A mis hijos, Javier y Laura.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: <http://sede.ull.es/validacion>

	Identificador del documento: 866822	Código de verificación: fbsse0hw	Fecha:
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA			08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ			08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ			08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO			14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO			14/03/2017 21:06:21



Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 <i>La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion</i>		
	Identificador del documento: 866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i> <i>En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA</i>		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
<i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i> <i>En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ</i>		08/03/2017 02:32:55
<i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i> <i>En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ</i>		08/03/2017 08:31:53
<i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i> <i>En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO</i>		14/03/2017 13:45:07
<i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i> <i>En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO</i>		14/03/2017 21:06:21

Agradecimientos

Durante estos años son muchas las personas e instituciones que han participado en este trabajo y a quienes quiero expresar mi gratitud por el apoyo y la confianza que me han prestado de forma desinteresada.

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento más sincero a los directores de la Tesis, el Dr. Silvestre Rodríguez Pérez y el Dr. Rafael Pérez Jiménez, por su dedicación, su paciencia, sus valiosas ideas y excelentes consejos, y por haber confiado en mí para que este barco llegara a buen puerto.

Asimismo, agradezco a mis amigos y compañeros de las áreas de Tecnología Electrónica, de Teoría de la Señal y Comunicaciones y de Ingeniería Telemática de la Universidad de La Laguna por su apoyo personal y humano, especialmente a Alejandro y a Oswaldo, con quienes he compartido proyectos e ilusiones durante estos años. Muchísimas gracias y mi más sincero afecto.

A mis compañeros Juan Carlos y Albano por su acogida y amistad, son muchos los ratos agradables que pasamos en el despacho, mil gracias por haberme hecho la vida mucho más fácil durante estos años de trabajo.

A Carlos y a Gara, la vida los puso en mi camino y me permitió exprimir sus conocimientos sobre programación. Muchas gracias por su esfuerzo y perseverancia.

También quiero agradecer la acogida, el apoyo y los medios recibidos en los distintos centros donde he desarrollado parte de mi doctorado. A Jose, Paco y demás miembros del grupo de investigación de Tecnología Fotónica y Comunicaciones de la ULPGC, dirigido por el Dr. Rafael Pérez y al Dr. Francisco José López Hernández del Dpto. de Tecnología Fotónica y Bioingeniería de la UPM, muchísimas gracias por su amistad.

Gracias a todos los miembros del Dpto. de Ingeniería Industrial, y en general, a los miembros de la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología, gracias por hacer agradable el día a día.

Gracias al Ministerio de Economía, Industria y Competitividad y fondos FEDER, por las ayudas económicas concedidas a través de los Proyectos de Investigación TEC2013-47682-C2-2-P y TEC2009-14059-C03-03.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

Pero, sobre todo, muchísimas gracias a mis padres y hermana, sin su apoyo incondicional este trabajo nunca hubiera sido posible. También a Silver y a mis hijos, Javier y Laura, por su paciencia y por el tiempo que me han concedido. Este trabajo es también el vuestro.

A todos, muchas gracias.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
	Identificador del documento: 866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

Índice

Índice.....	iii
Resumen	vii
Abstract.....	ix
1. Introducción.....	1
1.1. Clasificación de los enlaces ópticos no guiados de interior.....	3
1.2. Grupos de investigación en sistemas de comunicaciones ópticas no guiadas.....	4
1.3. Objetivos y líneas seguidas.....	6
1.4. Estructura del trabajo.	8
2. Estado del arte.....	11
2.1. Sistemas ópticos no guiados de transmisión de datos.	11
2.1.1. Sistemas no guiados de transmisión de datos por enlace infrarrojo en interiores.	11
2.1.2. Sistemas no guiados de transmisión de datos por enlace en el espectro visible.	12
2.2. Características generales de los sistemas de comunicaciones ópticas no guiados en interiores.	16
2.2.1. Fuentes de señal.	16
2.2.2. Receptores.	18
2.2.3. Fuentes de ruido en el canal óptico no guiado.....	23
2.2.3.1. Fuentes de iluminación ambiental.	23
2.2.3.2. Ruido térmico.	26
2.2.4. El canal óptico no guiado en interiores.....	30
2.2.5. Detección en diversidad angular: técnicas de combinación.	35
3. Simulación del canal óptico no guiado en interiores.....	41
3.1. Modelo de propagación.....	43
3.1.1. Modelo del emisor óptico.....	43
3.1.2. Modelo del receptor óptico.....	43
3.1.3. Modelo del reflector.	44
3.2. Descripción del algoritmo MMC.	45
3.2.1. Respuesta al impulso por visión directa.	45
3.2.2. Respuesta al impulso debida a múltiples reflexiones.....	45
3.2.3. Generación de los rayos desde el emisor.	49
3.2.4. Propagación del rayo.....	51
3.2.5. Evaluación del error debido al método de Monte Carlo.	52

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

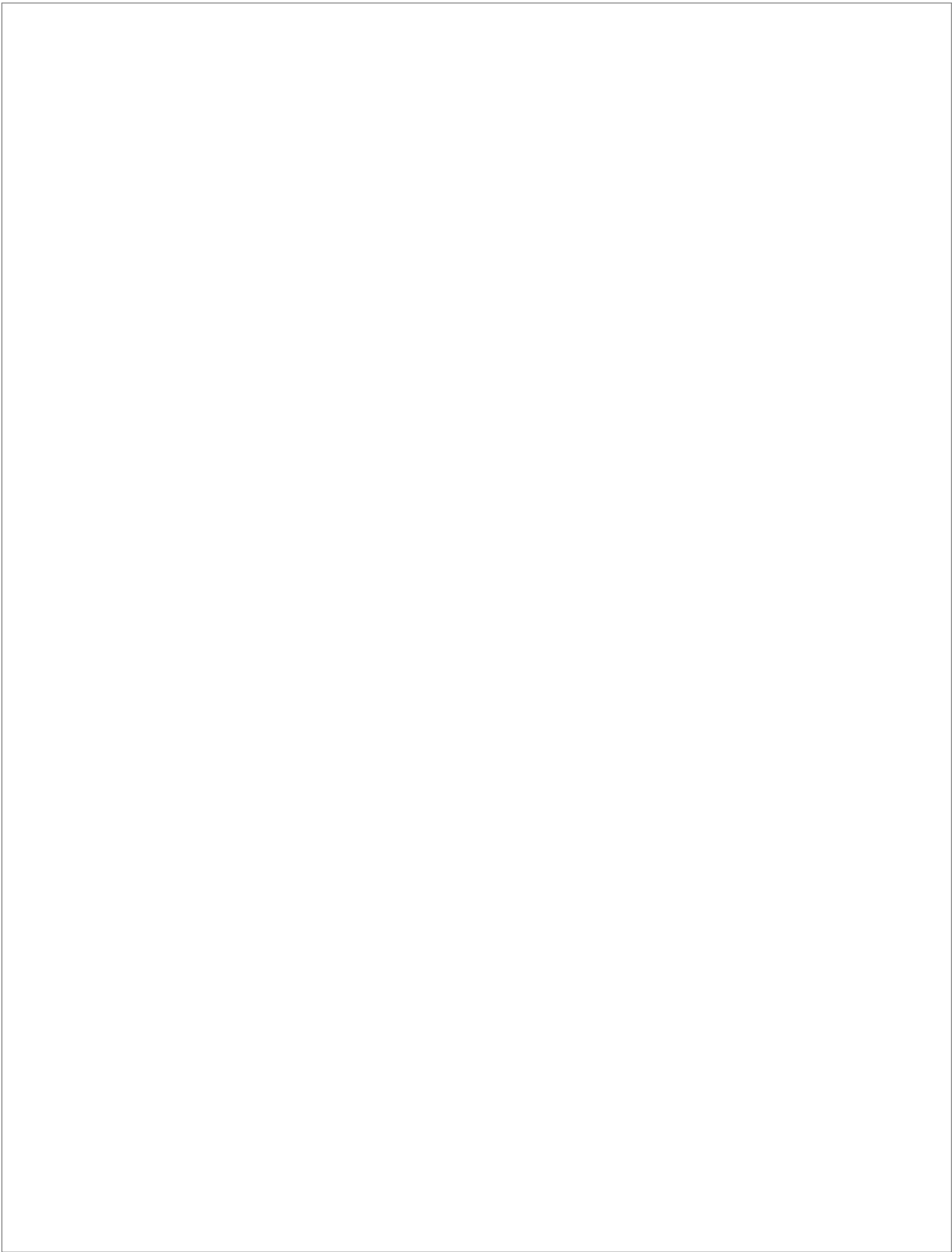
3.3.	Modelo de ruido debido a la iluminación ambiental.....	55
3.3.1.	Fuentes artificiales de luz: lámparas incandescentes.....	55
3.3.2.	Fuentes naturales de luz.....	56
3.4.	Adaptación del algoritmo MMC para enlaces VLC.	61
3.4.1.	Cálculo de la respuesta al impulso.....	62
3.4.2.	Evaluación del error debido al método de Monte Carlo.	65
3.4.3.	Resultados de simulación de un enlace VLC.....	66
4.	Mejora gráfica y computacional del programa de simulación del canal óptico no guiado	71
4.1.	Diseño asistido por computador.....	71
4.1.1.	Tipos de programas CAD.	72
4.1.2.	Definición de gráficos o escenas 3D.	74
4.2.	Descripción de la herramienta de simulación.	76
4.2.1.	Definición del entorno de simulación.	77
4.2.2.	Interfaces de utilización de la herramienta de simulación.	79
4.2.3.	Ejemplo de simulación.....	84
4.3.	Mejoras computacionales de la herramienta de simulación.	85
4.3.1.	Optimización computacional de la propagación del rayo.....	85
4.3.2.	Paralelización del algoritmo de simulación.	87
4.3.3.	Evaluación de las mejoras computacionales.....	88
5.	Modelo de receptor sectorizado aplicable a algoritmos de trazado de rayos. 97	
5.1.	Modelo de receptor sectorizado.....	97
5.2.	Validación del modelo de receptor sectorizado.....	101
5.3.	Influencia de los parámetros de diseño de un receptor sectorizado sobre las características del canal.	103
5.4.	Consideraciones sobre la estructura de un receptor sectorizado con diversidad angular.....	109
6.	Recepción en diversidad angular para la interconexión de sensores mediante enlaces ópticos no guiados.....	115
6.1.	Modelo de propagación.....	116
6.1.1.	Emisores y reflectores.....	118
6.1.2.	Fuentes de ruido.	118
6.1.2.1.	Ruido debido a la iluminación ambiental.....	118
6.1.2.2.	Ruido térmico.	120
6.1.3.	Simulación con un único elemento detector.	122
6.2.	Receptores con detección en diversidad angular.	126
6.2.1.	Receptor sectorizado en diversidad angular.	127
6.2.2.	Receptor convencional en diversidad angular.	130
6.2.3.	Receptor auto-orientable.	133

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

6.3. Estudio comparativo de receptores en diversidad angular.....	135
6.3.1. Enlaces de baja velocidad: redes de sensores.	136
6.3.2. Enlaces de media/alta velocidad.	146
Conclusiones	153
Líneas futuras de investigación.....	157
Bibliografía	159
Lista de abreviaturas.....	185

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003
 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: <http://sede.ull.es/validacion>

Identificador del documento: 866822	Código de verificación: fbsse0hw	Fecha:
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21



Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: <http://sede.ull.es/validacion>

Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

Resumen

Las comunicaciones ópticas no guiadas se basan en la transmisión de datos usando radiación lumínica con longitudes de ondas comprendidas entre el infrarrojo y el ultravioleta. Esta región espectral permite disponer de un ancho de banda ilimitado y sin restricciones legales más allá de las referidas a la seguridad ocular en la banda del infrarrojo, y evitar cualquier tipo de incompatibilidad electromagnética con los sistemas de radiofrecuencia (RF) convencionales. Esto ha hecho que las comunicaciones ópticas no guiadas, tanto en el infrarrojo como en el visible (VLC), se postulen como una tecnología complementaria e incluso alternativa a la de RF en algunos entornos de aplicación. En este contexto, en el presente trabajo se realizan diferentes contribuciones sobre un algoritmo de simulación, basado en técnicas de trazado de rayos y en el método de Monte Carlo, y en el modelo de propagación existente, que conjuntamente con dicho algoritmo permite caracterizar el canal óptico no guiado en interiores. La herramienta de simulación desarrollada se ha aplicado al estudio del empleo de estructuras de recepción no formadoras de imagen con detección en diversidad angular para la interconexión de los nodos de una red de sensores óptica inalámbrica que trabaja en difusión para su uso en interiores.

Con la finalidad de simular configuraciones más realistas, además de modelar el ruido debido a las fuentes de iluminación ambiental, tanto natural como artificial, se ha realizado una revisión de los modelos existentes para caracterizar el ruido debido a la etapa de preamplificación que comúnmente se utiliza en el sistema receptor. Mientras que el modelo propuesto para aproximar el efecto de la iluminación natural mejora a los anteriores respecto a su eficiencia computacional, el propuesto para simular las fuentes de iluminación artificial permite considerar toda la potencia óptica debida a las múltiples reflexiones que sufre la iluminación antes de alcanzar al receptor.

Además de adaptar el modelo de propagación y el algoritmo para poder estudiar aquellos enlaces donde la transmisión óptica abarca un amplio rango espectral, tal y como acontece en los sistemas VLC, también se presentan varias mejoras orientadas a facilitar el uso de la herramienta de simulación y a disminuir su tiempo de ejecución. En relación con la utilización del programa de simulación, se proporciona la posibilidad de definir el enlace de comunicación mediante la utilización de aplicaciones gráficas comerciales de diseño 3D y caracterizar el canal óptico no guiado en cualquier entorno de interior por muy complejo que éste sea, donde pueden coexistir diferentes emisores y receptores en presencia de fuentes de iluminación ambiental. Con la finalidad de reducir el tiempo de simulación, se presentan dos optimizaciones basadas en mejorar la propagación de los rayos en el interior del entorno de simulación y en la paralelización del algoritmo de simulación. La primera permite reducir el tiempo de ejecución como

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

mínimo en un treinta por ciento, y la segunda, obtener una aceleración de cómputo prácticamente proporcional al número de procesadores utilizados

Por último, se presenta un estudio comparativo de las prestaciones derivadas de utilizar tres tipos de receptores no formadores de imagen en diversidad angular como elemento detector de la radiación óptica recibida por los nodos de una red de sensores infrarroja que trabaja en difusión en ambientes de interior y en la que se transmite con una tasa de bit inferior a 115 kb/s. Los receptores en diversidad estudiados son el receptor convencional (CDR), el auto-orientable (SOR) y el receptor sectorizado (SDR). Para este último se presenta un modelo matemático aplicable a algoritmos de trazado de rayos, que permite caracterizar su área efectiva de detección y que ha permitido establecer la estructura óptima que debe presentar este tipo de receptores respecto a los principales parámetros que caracterizan el canal óptico no guiado en interiores. Como resultado del estudio comparativo se demuestra que el receptor convencional en diversidad angular en conjunción con la técnica de combinación EGC es la solución que exhibe las mejores prestaciones en cuanto a la SNR, eficiencia en potencia transmitida, así como requerimientos de capacidad computacional y consumo de energía. Es decir, dicho receptor empleando EGC es el que mejor se ajusta a las principales limitaciones que presentan los nodos de una red de sensores infrarroja que opera en difusión.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: <http://sede.ull.es/validacion>

Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

Abstract

Optical wireless communications rely on the transmission of data using light radiation with wavelengths between the infrared and ultraviolet. This region of the spectrum provides an unlimited bandwidth with no legal restrictions beyond those associated with eye safety in the infrared band. It also avoids any kind of electromagnetic interference with conventional radiofrequency (RF) systems. This has resulted in optical wireless communications in both the infrared and visible (VLC) bands being considered as a complementary, or even alternative, technology to RF in some application settings. In this context, this work offers various contributions involving a simulation algorithm based on ray tracing techniques and the Monte Carlo method, and on the existing propagation model which, along with said algorithm, allows characterizing the optical wireless channel in indoor environments. The simulation tool developed has been applied to study the use of non-imaging angle-diversity receivers as input sensor of nodes of an indoor optical wireless sensor network for broadcast communications.

In an effort to simulate more realistic configurations, in addition to modeling the noise from both natural and artificial ambient light sources, we reviewed existing models for characterizing noise from the pre-amplification stage that is commonly used in the receiver system. While the model proposed for approximating the effect of natural light improves on earlier models in terms of computational efficiency, the one proposed for simulating sources of artificial light allows considering all of the optical power associated with the multiple reflections that the light undergoes before reaching the receiver.

In addition to adapting the propagation model and the algorithm to allow studying those links where the optical transmission spans a wide spectral range, as is the case in VLC systems, several improvements intended to facilitate the use of the simulation tool and reduce its execution time are also presented. As concerns the use of the simulation program, we provide the possibility of defining the communications link through the use of commercial 3D graphics design applications to characterize the optical wireless channel in any indoor setting, regardless of its complexity, and in the presence of multiple emitters, receivers and ambient light sources. So as to reduce the simulation time, two optimizations intended to improve ray propagation inside the simulation environment and the parallelization of the simulation algorithm are proposed. The former reduces the execution time by a minimum of thirty percent, and the latter accelerates the computation time in a way that is practically proportional to the number of processors used.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

Lastly, we present a comparative study of the performance associated with using three types of non-imaging angle-diversity receivers as the element for detecting the optical radiation received by the nodes of an indoor infrared sensor network operating in a diffuse link transmitting at a bit rate below 115 kbps. The angle-diversity receivers studied are of the conventional (CDR), self-oriented (SOR) and sectored (SDR) receivers. We present a mathematical model for the SDR applicable to ray-tracing algorithms that allows characterizing its effective detection area and that has been used to determine the optimal structure that offers the best performance with respect to the main parameters that characterize the indoor optical wireless channel. As a result of the comparative study, we show that the conventional angle-diversity receiver used in conjunction with the EGC technique is the solution that exhibits the best performance in terms of SNR, transmitted power efficiency, computational requirements and energy consumption. In other words, this type of receiver employing EGC best adapts to the main limitations affecting the nodes of an indoor infrared sensor network for broadcast communications.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

Capítulo 1

Introducción

Los sistemas de comunicación de datos no guiados representan un sector de rápido crecimiento y creciente importancia en el conjunto de la industria de las comunicaciones. Entre las principales tecnologías que se utilizan para lograr esta comunicación, enlaces vía radiofrecuencia (RF, *Radiofrequency*) y/o radiación óptica, es en ésta última donde se enmarca el presente trabajo. Han pasado más de treinta años desde que las comunicaciones ópticas no guiadas (OW, *Optical Wireless*) se propusieron como una tecnología alternativa a las comunicaciones por radiofrecuencia de corto alcance y alta velocidad, sobre todo en entornos hospitalarios, aeronáuticos e industriales, en los cuales, además de la saturación de espectro, existen severas restricciones de emisión electromagnética que hacen inviable el uso de este tipo de sistemas.

Las comunicaciones ópticas no guiadas se basan en la transmisión de datos usando radiación lumínica con longitudes de ondas comprendidas entre el infrarrojo y el ultravioleta. Esta región espectral ofrece no sólo la posibilidad de disponer de un ancho de banda ilimitado y sin restricciones legales más allá de las referidas a la seguridad ocular en la banda del infrarrojo, sino que además evita cualquier tipo de incompatibilidad electromagnética con los sistemas de RF convencionales. Este hecho hace que las comunicaciones ópticas no guiadas, tanto en el espectro infrarrojo (IR, *InfraRed*) como en el visible (VLC, *Visible Light Communications*), se postulen como una tecnología no sólo complementaria a la de radiofrecuencia, sino incluso como una alternativa en ciertos entornos de aplicación.

A diferencia de las emisiones en RF, la radiación óptica no puede atravesar paredes u otros objetos opacos. Si bien esto puede ser un inconveniente en determinados tipos de enlaces, también es una ventaja ya que la radiación queda confinada dentro del recinto o habitación donde se origina. Estas superficies aunque no dejan pasar la radiación a habitaciones contiguas, dan lugar a efectos de reflexión y dispersión de dicha radiación. Este confinamiento le proporciona cierta privacidad y evita la interferencia entre enlaces operando en diferentes recintos. El canal está sujeto a sombras provocadas por objetos fijos o móviles y por el mobiliario de la habitación. A diferencia del de RF, en el mismo se pueden despreciar los efectos de desvanecimiento por multitrayectoria (*multipath fading*), dada la dimensión espacial del detector con respecto a la longitud de onda de la radiación. Sin embargo, sí está sujeto a dispersión temporal por multitrayectoria

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

Tabla 1-1. Comparación de los sistemas ópticos no guiados (OW) frente al de RF para comunicaciones inalámbricas en ambientes de interior.

Propiedades	RF	OW
Ancho de banda regulado	Sí	No
Atraviesa las paredes	Sí	No
Desvanecimiento por multitrayectoria	Sí	No
Dispersión por multitrayectoria	Sí	Sí
Pérdidas por propagación	Alta	Alta
Fuentes de ruido	Interferencia de otros usuarios y ruido eléctrico	Iluminación ambiental
SNR	Depende de la amplitud de la señal RF	Depende de la potencia de la señal óptica
Restringido por seguridad ocular	No	Sólo IR

(*multipath dispersion*). Por último, la disponibilidad de componentes ópticos de pequeño tamaño, bajo consumo de potencia, capaces de operar a velocidades altas y relativamente de bajo coste, hacen a los sistemas de comunicaciones ópticos no guiados apropiados para aplicaciones portátiles.

Estas ventajas sin embargo, no hacen a las comunicaciones ópticas no guiadas un reemplazo universal frente a las de RF. El confinamiento hace que la transmisión entre habitaciones requiera la instalación de cableado y la localización de puntos de acceso. La iluminación, tanto natural debida a la luz solar, como artificial (bombillas incandescentes o lámparas fluorescentes), componen una importante fuente de ruido que contribuye a degradar las prestaciones del canal. Además, presenta elevadas pérdidas por propagación (PL, *Path Loss*) y existen regulaciones de seguridad impuestas por organismos como la ANSI (*American National Standards Institute*) o la IEC (*International Electrotechnical Commission*), que limitan la potencia de emisión en el IR debido a las lesiones oculares o cutáneas que se podrían generar a los usuarios que se encuentren en el entorno [ANSI07, IEC07]. Dichas restricciones, que varían en función de la longitud de onda, del tamaño de la fuente y su directividad, únicamente afectan a los dispositivos láser debido a la alta coherencia espectral y temporal de la radiación que emiten, quedando exentos de regulación los sistemas de comunicaciones ópticos no guiados en el espectro visible o VLC.

La Tabla 1.1 muestra una comparación de los aspectos fundamentales que caracterizan el canal óptico no guiado y el de radiofrecuencia. El uso de uno u otro canal depende principalmente de la aplicación que vaya a tener el sistema de comunicación. El canal de RF es adecuado para aplicaciones de largo alcance

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

donde se requiere gran movilidad por parte del usuario y que la radiación atraviese obstáculos y paredes, mientras que el canal óptico, en el infrarrojo o en el visible, conviene ser usado en aplicaciones de corto alcance donde se requiera alta capacidad y velocidad de transmisión, bajo coste y receptores de baja complejidad.

1.1. Clasificación de los enlaces ópticos no guiados de interior.

Los enlaces ópticos inalámbricos de interior se pueden clasificar atendiendo a dos criterios. El primer criterio es el grado de direccionalidad del emisor y del receptor. Los enlaces directos se caracterizan por emplear emisores y receptores con un alto grado de direccionalidad, necesitando un apuntamiento entre ambos para establecer el enlace, mientras que los no directos emplean emisores y receptores de baja direccionalidad, aliviando dicha necesidad. Los enlaces directos son más eficientes en cuanto al aprovechamiento de la potencia óptica radiada, presentan menores pérdidas por propagación y son menos sensibles al ruido producido por la iluminación ambiente que los no directos, más convenientes en aplicaciones donde los terminales son móviles. También es posible establecer enlaces híbridos que combinan emisores y receptores con diferentes grados de direccionalidad.

El segundo criterio de clasificación hace referencia a si existe o no línea de visión directa (*Line Of Sight*, LOS), entre el emisor y el receptor. Los enlaces LOS, o con línea de visión directa, son aquellos en los que la radiación llega al receptor directamente desde el emisor sin sufrir ningún tipo de reflexión o difusión, mientras que los enlaces No-LOS, o enlaces sin línea de visión directa, se basan en la recepción de la radiación proveniente de diferentes reflexiones o difusiones en el techo, paredes u otras superficies. Los enlaces LOS son más eficientes en cuanto al aprovechamiento de potencia y presentan menor dispersión que los No-LOS, pero son menos robustos frente a la presencia de obstáculos entre el emisor y receptor.

En la práctica se suelen emplear dos tipos principales de enlaces: los enlaces LOS o punto a punto y los enlaces en difusión (Figura 1.1). Como se ha mencionado anteriormente, los enlaces LOS son los que permiten alcanzar una máxima velocidad de transmisión al carecer de componentes debidas a la multipropagación. Al tratarse de emisores y receptores con un alto grado de direccionalidad, son vulnerables frente a la presencia de obstáculos y muy eficientes en potencia al presentar bajas pérdidas por propagación.

Los enlaces en difusión son enlaces no directos y en los que no existe una línea de visión directa entre el emisor y el receptor. Estos enlaces son los más robustos en lo que a presencia de obstáculos se refiere, ya que el receptor recibe la señal proveniente de reflexiones en distintas superficies del entorno. Este enlace presenta una gran dispersión temporal por multitrayectoria, por lo que su

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

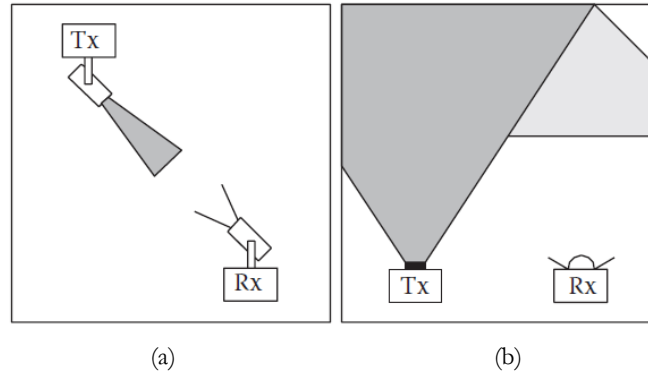


Figura 1.1. Configuraciones prácticas de enlaces ópticos. (a) Enlace LOS. (b) Enlace Difuso.

máxima velocidad de transmisión se encuentra más limitada que en el caso de los enlaces LOS. Son menos eficientes en cuanto al aprovechamiento de la potencia óptica radiada, dado que gran parte de ella se pierde en las reflexiones antes de llegar al receptor. El emisor y receptor presentan diagramas de radiación poco direccionales con la intención de que la radiación se distribuya lo máximo posible y se recolecte energía de la mayor cantidad de direcciones posibles.

1.2. Grupos de investigación en sistemas de comunicaciones ópticas no guiadas.

Con el auge de las comunicaciones ópticas no guiadas como tecnología alternativa a los sistemas de radiofrecuencia han surgido multitud de grupos de investigación tanto a nivel nacional como internacional, que han centrado sus esfuerzos en dicho campo.

En lo que respecta al ámbito español, destacan los estudios realizados por el grupo de investigación del Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Málaga, sobre comunicaciones mediante enlaces ópticos atmosféricos, y sobre el desarrollo de enlaces ópticos no guiados que emplean diversidad angular y técnicas de modulación de tasa adaptativa para la conexión de nodos de redes ópticas inalámbricas de área local [Jurado-Navas11, Garrido-Balsells05, Castillo-Vázquez04]. Relevantes son también las aportaciones realizadas por el grupo de investigación dirigido por el Dr. López Hernández, perteneciente al Departamento de Tecnología Fotónica y Bioingeniería de la Universidad Politécnica de Madrid, sobre la caracterización mediante simulación del canal óptico inalámbrico en interiores, o sobre el diseño y desarrollo de sistemas de transmisión y recepción para sistemas de comunicaciones en el IR y visible, o los trabajos derivados en el seno del mismo grupo sobre codificación

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

[Martín-González09, Poves11, López-Hernández11], así como sobre el balance de potencia global de este tipo de sistemas cuando se emplean en sistemas de iluminación [DelCampo16]. También caben destacar los trabajos sobre caracterización del canal, el uso de técnicas de recepción en diversidad angular, y el desarrollo de sistemas OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) para comunicaciones ópticas inalámbricas; que se han llevado a cabo por parte del grupo de investigación donde se ha desarrollado este trabajo de Tesis [Rodríguez02, González05a-c], y por el Grupo de Tecnología Fotónica y Comunicaciones del Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, que dirige el Dr. Pérez Jiménez [IDeTIC]. De este último grupo, también destacan sus propuestas sobre la aplicación de sistemas VLC en redes de sensores, así como en comunicaciones entre vehículos, subacuáticas y mediante el uso de cámaras ópticas u OCC (*Optical Camera Communications*) [Quintana13, Rodríguez13a-c, Delgado14, González15].

En Europa, hay que destacar la actividad de grupos como los de la Universidad de Oxford, dirigido por el profesor D. O'Brien y que han realizado multitud de trabajos sobre sistemas MIMO (*Multiple Input and Multiple Output*) aplicados tanto a enlaces punto a punto, alcanzando tasas de 1,25 Gb/s, como sobre sistemas VLC e IR de altas velocidades con las que se han alcanzado velocidades por encima de los 100 Gb/s [Minh09, O'Brien10], a veces empleando codificaciones DMT (*Discrete Multitone*) [Vuçic11]. Además, se han realizado estudios acerca del uso de la tecnología PLC (*Power Line Communications*) como *backbone* o columna principal para realizar la distribución de datos dentro de los hogares [Tonelo10].

También son dignos de mencionar los estudios sobre receptores con diversidad espacial realizados en la Universidad de Edimburgo por el grupo del profesor H. Haas [Mesleh11, Tsonev13]. Otras aportaciones a destacar sobre el desarrollo de receptores con diversidad angular y sistemas MIMO, son las del grupo dirigido por el profesor L. N. Alves de la Universidad de Aveiro [Alves00a, Alves00b]. El profesor Z. Ghassemlooy en la Universidad de Northumbria, el profesor S. Zvánovec en la Universidad Técnica de Praga o el profesor M. Uysal en la Universidad Ozyegin de Estambul [Ghassemlooy12, Jungnickel15, Uysal14, Sarbazi14a, Sarbazi14b, Miramirkhani15].

En Estados Unidos son destacables los grupos que se han constituido a partir de los trabajos de J. M. Kahn en la Universidad de Berkeley [Berkeley] y el grupo de T. Little en la Universidad de Boston. Estos últimos fueron los coordinadores del proyecto SMART LIGHTING [Boston], destinado al desarrollo de aplicaciones VLC en entornos domésticos [Little08, Chau10]. Otros trabajos que han tenido bastante repercusión en el campo de las comunicaciones punto a punto en espacio libre son los realizados por Z. Hajarian en la Universidad de

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

Pensilvania State bajo la dirección de M. Kavehrad [Hajjarian09], y los trabajos sobre diversidad angular propuestos por el grupo formado por G. Yun y últimamente los de H. Elgala en la Universidad de New York State-Albany [Elgala09, Elgala11].

Por su parte, en el continente asiático, hay que hacer mención especial a la actividad que se realiza en Japón, no sólo por ser el lugar donde nació la tecnología VLC con los trabajos de T. Komine y M. Nakagawa en la Universidad Keio [Komine04], sino también por la gran apuesta que se ha realizado desde el tejido empresarial. De hecho, en 2003 se creó el primer consorcio, el *Visible Light Communications Consortium* [VLCC], que desde entonces ha tenido una gran repercusión tanto en el proceso de estandarización, como en la publicitación y divulgación de dicha tecnología. Entre la gran cantidad de demostradores que se han llevado a cabo, destacan las comunicaciones coches-semáforos desarrolladas en la Universidad de Nagoya [Iwasaki08] y los prototipos con receptores basados en matrices o *arrays* de sensores CMOS realizados en la Universidad de Keio [Matsumoto08]. También en el continente asiático, son dignos de mención los trabajos de la Universidad de Bushan (Corea) en coordinación con fabricantes como Samsung.

1.3. Objetivos y líneas seguidas.

Los estudios que se han venido realizando en el campo de las redes ópticas no guiadas en interiores se centran básicamente en tres campos. El primero de ellos se refiere al estudio del canal óptico, en concreto, resolver el problema de la propagación de la radiación infrarroja o visible en ambientes de interior en función de la situación de los obstáculos, las características ópticas de los materiales y las posiciones de los emisores y receptores. El segundo, corresponde a la selección de esquemas de modulación adecuados a las particulares del canal. Se buscan, en este caso, diseños de alta eficiencia espectral y elevada robustez frente a la multipropagación y al *jitter*. El tercero es el diseño e implementación de circuitos moduladores, demoduladores, emisores y receptores. Si bien estas tres líneas son interdependientes entre sí, en este trabajo de Tesis se abarcan aspectos relacionados con el primer y tercer campo, mientras que en otros trabajos de este grupo de investigación, y de aquellos con los que se colabora, también tratan en profundidad aspectos relacionados con el estudio y aplicación de técnicas de codificación y modulación.

En trabajos previos realizados por este grupo de investigación se ha desarrollado un algoritmo de simulación que permite caracterizar el canal infrarrojo de manera eficiente para diferentes tipos de enlaces, a la vez que se ha trabajado en la búsqueda de modelos que intentan aproximar lo máximo posible las características reales de los elementos que se encuentran en interiores: superficies reflectoras, emisores, lentes, receptores y concentradores. Asimismo,

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

para mitigar la hostilidad del canal, no sólo en el IR, sino también en el visible, se han empleado esquemas de modulación OFDM que son especialmente robustos frente a variaciones espaciales de los parámetros del enlace y que permiten operar con elevados regímenes binarios. Para llevar a cabo dicho trabajo, se aprovechó la experiencia acumulada que sobre la caracterización de canales ya disponían los dos grupos de investigación con los que se ha colaborado hasta la fecha: el Grupo o división de Tecnología Fotónica y Comunicaciones del IDETIC de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, al cual pertenece el Dr. Pérez Jiménez, uno de los directores de esta Tesis, y el Grupo del Dr. López Hernández, perteneciente al Departamento de Tecnología Fotónica de la Universidad Politécnica de Madrid.

El objetivo principal planteado en el presente trabajo ha sido estudiar mediante simulación la utilización de receptores no formadores de imagen que emplean detección en diversidad angular como etapa de entrada de los nodos de una red de sensores óptica inalámbrica que trabaja en difusión o *broadcast* en ambientes de interior. Para poder alcanzar este objetivo, ha sido necesario realizar una revisión de la herramienta de simulación desarrollada con anterioridad para caracterizar el canal infrarrojo en ambientes de interior y de los modelos existentes utilizados para aproximar el efecto de los elementos que se encuentran en este tipo de entornos: superficies, emisores y receptores.

Tras analizar la herramienta de simulación desarrollada, se detectó la necesidad de realizar dos mejoras orientadas a facilitar y extender su uso, así como disminuir su tiempo de ejecución. La primera mejora consistió en aprovechar las aplicaciones gráficas comerciales de diseño 3D existentes para que el usuario pueda definir el enlace óptico no guiado en cualquier ambiente de interior por muy complejo que éste sea, donde coexistan distintas fuentes emisoras y dispositivos receptores en presencia de fuentes de iluminación ambiental, tanto de tipo natural como artificial. En relación con la reducción del tiempo de simulación, se optó por optimizar la propagación de los rayos en el interior del entorno de simulación y paralelizar el algoritmo de simulación. Además de modelar el ruido derivado de las fuentes de iluminación ambiental, y con la idea de tratar configuraciones más realistas, fue necesario efectuar una revisión de los modelos propuestos para caracterizar el ruido térmico debido a la etapa de preamplificación que comúnmente se utiliza en el receptor.

Una vez desarrollada la herramienta de simulación, se procedió a la búsqueda de modelos aplicables a dicha herramienta que han permitido caracterizar las tres estructuras de recepción con detección en diversidad angular que han sido objeto de estudio en este trabajo de Tesis. El uso conjunto de dicha herramienta de simulación y de los modelos matemáticos propuestos, ha permitido alcanzar el objetivo inicialmente planteado, es decir, estudiar la utilización de receptores que emplean detección en diversidad angular para realizar la interconexión de los

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

sensores que forman parte de una red óptica inalámbrica que trabaja en difusión en recintos cerrados.

1.4. Estructura del trabajo.

Este trabajo se ha estructurado de la siguiente manera: tras esta introducción, en el capítulo 2 se expone el estado del arte de los sistemas de transmisión de datos no guiados, introduciendo aspectos generales y los principales trabajos realizados sobre sistemas ópticos no guiados en ambientes de interior que utilizan como medio de transmisión tanto el espectro infrarrojo como el visible. Así, se estudia la evolución y se revisan las características específicas de los elementos que constituyen este tipo de sistemas: emisores, receptores, reflectores y fuentes de ruido. En dicho capítulo, se hace especial hincapié en exponer los tres tipos de estructuras básicas de recepción que comúnmente se suelen emplear para conseguir detección en diversidad angular: el receptor convencional en diversidad angular, el formador de imagen y el sectorizado; y las técnicas de combinación que usualmente se utilizan para procesar las señales recibidas por los múltiples elementos de detección de los que consta un receptor con detección en diversidad angular.

En el capítulo 3 se realiza una breve revisión de la herramienta de simulación previamente desarrollada por este Grupo de Investigación, basado en un algoritmo de simulación fundamentado en el uso de técnicas de trazado de rayos y en el método de Monte Carlo, y del modelo de propagación utilizado por dicha herramienta de simulación para caracterizar el canal óptico no guiado en interiores. Asimismo, en este capítulo también se describen las dos primeras aportaciones de este trabajo, las cuales están directamente relacionadas con el modelo de propagación, es decir, con los modelos matemáticos utilizados para aproximar el efecto de cada uno de los elementos que conforman en el canal óptico no guiado en ambientes de interior y que conforman el entorno de simulación: emisores, reflectores y receptores. Como primera aportación se propone un modelo alternativo que permite computar de manera más eficiente, que las propuestas realizadas hasta este momento, el ruido debido a las fuentes de iluminación naturales extensas como las ventanas. La segunda aportación ha consistido en la adaptación de la herramienta de simulación, inicialmente diseñada para estimar la respuesta al impulso de canales infrarrojos en interiores, a las características del canal visible. Es decir, disponer una herramienta de simulación que permita caracterizar el canal óptico no guiado tanto en el espectro IR como en el visible.

Como tercera aportación, en el capítulo 4 se incorporan dos mejoras orientadas a facilitar y extender el uso de dicha herramienta de simulación y a disminuir su tiempo de ejecución. La primera mejora posibilita que el usuario pueda definir el enlace de comunicación mediante la utilización de aplicaciones

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

gráficas de diseño 3D y obtener la respuesta al impulso del canal óptico no guiado en cualquier ambiente de interior por muy complejo que éste sea, donde coexisten distintas fuentes emisoras y dispositivos receptores en presencia de fuentes de iluminación ambiental de tipo natural y artificial. En relación con la disminución del tiempo de simulación, se han llevado a cabo dos optimizaciones basadas en mejorar la propagación de los rayos en el interior del entorno de simulación y en la paralelización del algoritmo de simulación.

En el capítulo 5 se presenta, como aportación principal, un modelo matemático para aproximar el área efectiva de detección en un receptor sectorizado con forma semiesférica, aplicable a algoritmos basados en la utilización de técnicas de trazado de rayos. Asimismo, se presenta un estudio detallado de los efectos de los parámetros de diseño que definen la estructura de este tipo de receptores sobre los principales parámetros que caracterizan el canal óptico no guiado en interiores, con la finalidad de establecer la configuración de aquel receptor sectorizado que mejores prestaciones presenta respecto a la dispersión temporal debida a la multipropagación y las pérdidas ópticas por propagación.

En el capítulo 6 se realiza un estudio comparativo del uso de tres estructuras de recepción no formadoras de imagen que emplean detección en diversidad angular, como etapa de entrada de los nodos de una red de sensores óptica inalámbrica que trabaja en difusión, caracterizada por trabajar con enlaces que operan a bajas velocidades de transmisión. La comparación se ha llevado a cabo en términos de las mejoras obtenidas en la dispersión de retardo, las pérdidas por propagación, la relación señal a ruido del canal y la técnica de combinación empleada. Aunque el objetivo principal era estudiar el uso de dichas estructuras en condiciones de baja velocidad, también se ha extendido el estudio a enlaces que operan a media/alta velocidad, como es el caso de las redes de área local inalámbricas.

Finalmente, en el último capítulo, se enumeran las conclusiones y principales aportaciones de este trabajo, así como las ideas que han surgido a lo largo del mismo y que se esperan llevar a cabo en futuras investigaciones.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21



Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: <http://sede.ull.es/validacion>

Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

Capítulo 2

Estado del arte

Como se ha comentado en el capítulo anterior, los sistemas de comunicación de datos no guiados han constituido un sector de rápido crecimiento e importancia en el conjunto de la industria de las comunicaciones. En este capítulo se realiza una breve revisión sobre la situación actual de dichos sistemas y se examinan las características generales de los elementos que constituyen un sistema óptico no guiado en interiores: fuentes de señal, receptores y canal óptico inalámbrico; puesto que este tipo de sistemas son los que están directamente relacionados con el trabajo desarrollado en este trabajo de Tesis.

2.1. Sistemas ópticos no guiados de transmisión de datos.

Las principales tecnologías que se emplean en el campo de la transmisión de datos no guiados en interiores son los sistemas por radiofrecuencia (que incluyen redes de área local, de área personal o redes de sensores inalámbricas), y frente a estas, no tanto como tecnología alternativa sino como complementaria, se está proponiendo el uso de enlaces ópticos no guiados que transmiten en el espectro visible o Comunicaciones por Luz Visible (VLC, *Visible Light Communications*) [Komine04, Langer07, Nakagawa07, Langer09]. El uso de estas tecnologías fue definido por el comité 802.11 de IEEE [IEEE 802.11], si bien las redes IR basadas en este estándar no alcanzaron un gran desarrollo, debido a la aparición del estándar comercial de comunicación infrarroja de corta distancia definido por la organización IrDA (*Infrared Data Association*) [IrDA], en la actualidad, ambos estándares están en desuso, habiendo sido superados en el mercado de las telecomunicaciones por sistemas de radiofrecuencia como *Bluetooth* y *Wi-Fi*. Por último, cabe resaltar que recientemente los sistemas VLC o de iluminación por LED (*Light-Emitting Diodes*), que se denominan comúnmente como *illumination*, resultado de la unión de *illumination* y *communication*, están siendo estandarizados por el grupo de trabajo IEEE 802.15.7 [IEEE 802.15 TG7], cuya última versión revisada del estándar está en fase de aprobación.

2.1.1. Sistemas no guiados de transmisión de datos por enlace infrarrojo en interiores.

Como primera aproximación se pueden establecer dos grandes familias de sistemas de transmisión de datos mediante enlaces ópticos no guiados en el infrarrojo: enlaces punto a punto de alta velocidad para la interconexión de redes,

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

para el acceso a edificios o para unir puntos remotos como pueden ser cámaras de vigilancia o establecimientos de control, los enlaces punto a punto para la interconexión de dispositivos a baja/media velocidad y los enlaces en difusión para el establecimiento de redes de datos o en las redes de sensores ópticas inalámbricas.

Prácticamente la totalidad de los sistemas de comunicación que utilizan enlaces punto a punto de alta velocidad se enmarcan dentro de lo que se conocen como Comunicaciones Ópticas en Espacio Libre o FSO (*Free Space Optics*) [Acampora99, LightPointe, AirePointe]. Entre sus campos de aplicación destacan, sobre todo, la interconexión de las redes locales de los distintos edificios de una misma empresa, la instalación de redes temporales durante un espacio corto de tiempo ante la destrucción de la red principal debido a algún tipo de desastre natural o de otro tipo, la instalación de una red redundante de apoyo a otra principal para prevenir posibles desconexiones temporales de esta última, etc. Respecto a los enlaces punto a punto de baja/media velocidad, básicamente se emplean para la interconexión de dispositivos, siendo el sistema comercial más conocido el desarrollado por el consorcio IrDA [Goldberg95, IrDA], y que fue adaptado por los mayores fabricantes de sistemas informáticos.

Los sistemas de comunicación que necesitan asegurar una cierta movilidad de los equipos o dispositivos receptores, como es el caso de las redes WLAN (*Wireless Local Area Network*) y las redes de sensores ópticas inalámbricas, necesariamente deben emplear enlaces que trabajen en difusión o *broadcast*, que evitan la necesidad de visión directa entre el transmisor y el receptor aprovechando las múltiples reflexiones que, sobre paredes u obstáculos de alrededor, provocan que una parte significativa de la señal recibida provenga de diferentes direcciones [Hashemi94a, Pahlavan94]. Los primeros antecedentes del empleo de enlaces IR por difusión total para redes de datos de alta velocidad en interiores fueron publicados por F.R. Gfeller en 1979 [Gfeller79]. Si bien este tipo de enlaces no necesitan que exista visión directa entre el emisor y el receptor, requieren un elevado consumo de potencia y su velocidad de transmisión se encuentra limitada debida al fenómeno de multipropagación.

Como se comentó con anterioridad, el uso de la tecnología infrarroja fue definido por los estándares de comunicación IEEE 802.11 e IrDA, hoy en día prácticamente en desuso debido a la aparición de los sistemas de radiofrecuencia *Bluetooth* y Wi-Fi, y los sistemas VLC.

2.1.2. Sistemas no guiados de transmisión de datos por enlace en el espectro visible.

En los últimos años, la utilización del espectro visible ha resurgido en los sistemas no guiados gracias al desarrollo de las lámparas LED, también denominadas sistemas de iluminación de estado sólido (SSL, *Solid State Lighting*),

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

como alternativa a las lámparas convencionales, ya que no sólo poseen una mejor eficiencia eléctrica y durabilidad, sino que además son más resistentes a diferentes condiciones atmosféricas e introducen la posibilidad de crear distintos ambientes luminosos, con diferentes colores e intensidades [Craford92, Zhou07]. Esto ha dado lugar a un nuevo concepto en el campo de las comunicaciones ópticas no guiadas conocido como Comunicaciones por Luz Visible o VLC [Tanaka03, Komine04]. Estos sistemas se caracterizan por utilizar las lámparas de LED un espectro de emisión blanco para transmitir datos digitales además de para iluminar el entorno. Esta atractiva característica ha despertado su interés en multitud de aplicaciones [Jovicic13, Gancarz13, Grobe13, Armstrong13, Shun-Hsiang13].

Las lámparas LED comerciales, básicamente, emplean dos tecnologías bien diferenciadas para la generación de luz blanca: el pc-LED (*Phosphor Converted LED*), también conocido como LED fosforescente o como YB-LED (*Yellow-Blue LED*), cuyo principio de funcionamiento se basa en utilizar un LED azul, fabricado de InGaN (Nitruro de Galio-Indio), cubierto por una capa de fósforo. Esta capa de fósforo absorbe parte de la luz azul y emite luz amarilla. La combinación de ambas partes amarillo-azul producen la luz blanca. [Steigerwald02]. La segunda tecnología utiliza el LED multichip tricolor RGB, o cuatricolor RGB más ámbar, para proporcionar luz blanca mediante la combinación de los tres o cuatro componentes, respectivamente. Los primeros, a pesar de que se caracterizan por tener un reducido coste, ser más eficientes y de fácil fabricación, poseen un espectro de emisión fijo (que algunos consideran como luz muy fría, *cool-white*) y una velocidad de conmutación limitada a 4 y 5 Mb/s debido al tiempo de caída que se genera debido a la persistencia del fósforo. Sin embargo, este efecto se puede mitigar filtrando ópticamente la componente azul de la señal recibida, llegándose a lograr tasas de transmisión de hasta 100 Mb/s con codificaciones OOK (*On-Off Keying*) [O'Brien08, Minh09, O'Brien10]. Basándose en el mismo procedimiento y empleando modulaciones mucho más eficientes espectralmente como DMT (*Discrete Multitone*) se ha logrado alcanzar hasta 230 Mb/s [Vuçic10]. Los segundos tipos de LED, que se basan en la combinación de tres LED, rojo, verde y azul, en un mismo dispositivo, son bastante más caros que los pc-LED, poseen velocidades de conmutación más elevadas y ofrecen la posibilidad de crear distintos ambientes luminosos, a costa de una mayor complejidad en su alimentación. Bajo la implementación de técnicas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) [Shrestha10], se han alcanzado velocidades de hasta 803 Mb/s [Vuçic11]. Otras propuestas, aunque aún están lejos de ser alternativas comerciales, han permitido resultados espectaculares en cuanto a velocidad, superiores a 1 Gb/s, no así en cuanto a rango de transmisión [Tsai13, Shuailong13, Khalid12]. Lo mismo ocurre, en trabajos recientes dentro del proyecto UP-VLC (*Ultra-Parallel Visible Light Communications*) [UP-VLC], donde se propone el empleo de matrices de μ -LED

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

(*micro-LEDs*) de GaN emitiendo en la banda del azul, para establecer una comunicación multicanal. Bajo este procedimiento y empleando esquemas de modulación OOK y OFDM, se han llegado a registrar velocidades de 1 Gb/s y 3 Gb/s, respectivamente [Rajbhandari15, Tsonev14, Zhang13].

En cuanto a la detección de estas señales, comúnmente se emplean fotodiodos comerciales de silicio, tanto PIN (*Positive Intrinsic Negative*) como APD (*Avalanche PhotoDiode*) que, aunque poseen una mejor responsividad en regiones próximas al infrarrojo, también son capaces de captar longitudes de onda cercanas al azul. A estos dispositivos es necesario añadirles filtros ópticos interferométricos de muy elevado coste en el caso de querer emplear técnicas WDM sobre LED de tipo RGB [Vučić11].

El estándar IEEE 802.15.7.

El uso del canal visible como enlace de bajada no sólo ofrece un amplio ancho de banda sin regular y una alternativa a las bandas de 2,4 GHz ya muy saturadas, sino que además permite usar las infraestructuras ya existentes en todas las viviendas u oficinas. Este hecho suscitó un gran interés por parte de las universidades, empresas y organizaciones de todo el mundo en orientar parte de sus esfuerzos en el estudio y desarrollo de este tipo de sistemas. En el año 2003, los japoneses crearon el consorcio VLCC (*Visible Light Communication Consortium*), cuyo objetivo era el de investigar y elaborar un estándar que permitiera el desarrollo de dicha tecnología [VLCC]. Como fruto de su trabajo, en el 2007, la asociación japonesa JEITA (*Japan Electronics and Information Technology Industries Association*) [JEITA] emite dos estándares, el JEITA CP-1222-*Visible Light ID System* y el JEITA CP-1221-*Visible Light Communication System* [JEITA_STD]. Por otro lado, desde el 2008, la Unión Europea había venido financiando el proyecto OMEGA (*bOME Gigabit Access*) [OMEGA], cuyas investigaciones se centraron en incorporar la tecnología VLC a las redes domésticas. En el 2009, y fruto de la colaboración entre el consorcio japonés VLCC e IrDA, se ampliaron las especificaciones del estándar IrDA con el fin de contener también a los sistemas que operan en las longitudes de onda propias del espectro visible. Paralelamente, en ese mismo año, se crea el grupo de trabajo IEEE 802.15.7 [IEEE 802.15 TG7], que en septiembre de 2011, publicaría el primer estándar internacional, el IEEE802.15.7, el cual pretendía regular, mediante la definición de las especificaciones de las capas MAC y PHY, el uso de la tecnología VLC en redes de área personal inalámbricas o WPAN [IEEE 802.15.7-2011]. En la actualidad, este estándar está siendo sometido a un proceso de actualización por el grupo de trabajo IEEE 802.15.7r1 [TG7r1-15-1] mediante diferentes acciones y colaboración con otros grupos de trabajo, asociaciones, instituciones y universidades. Ejemplos destacados de estas actividades de colaboración son los trabajos de la red de investigación europea OPTICWISE (COST 1101) [Jungnickel15] que busca incluir en la regulación sistemas que operen con

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

velocidades de datos desde 1 Mb/s hasta 10 Gb/s. Otras actividades a resaltar, son los trabajos que desarrollan el consorcio japonés VLCC, el coreano ETRI [Jeong14] o los llevados a cabo por empresas privadas como PureLiFi [PureLiFi15], Samsung, Casio, Eurescom, France Telecom, NEC Corporation, Orange, Panasonic, Sharp, Siemens AG, Telefónica, Toshiba, y la empresa canaria Lightbee, así como las actividades científicas llevadas a cabo por numerosas universidades e institutos de investigación, como la Universidad de Boston [Boston], Oxford [Oxford], Roma, Edinburgh [Edinburgh], Northumbria [Northumbria], Keio (JP), Wonkwang & Chosun (SK) y el Instituto de Telecomunicaciones Fraunhofer Heinrich Hertz [Fraunhofer].

Respecto a los esquemas de modulación y codificación, el estándar IEEE 802.15.7 [Rajagopal12, Roberts11] ha optado por tres posibles implementaciones del nivel PHY, soportando topologías tanto *peer-to-peer* como en estrella, con tasas de transmisión desde 11,67 kb/s hasta 96 Mb/s tanto en interiores como en exteriores. Las velocidades más bajas están asociadas a la utilización de esquemas VOOK (*Variable OOK*) que, ofrece un control de luminosidad ajustable o *dimming* a la vez que evita los problemas de parpadeo o *flickering* mediante el uso de una codificación tipo Manchester o codificaciones de bloque. Esta técnica se basa en utilizar una modulación OOK con un ciclo de trabajo muy reducido y añadir a continuación pulsos hasta lograr el nivel de *dimming* deseado [Lee11b]. La segunda implementación, asociada a la consecución de las velocidades de transmisión medias, se basa en el empleo de un esquema de modulación VPPM (*Variable PPM*), el cual consiste en combinar una modulación 2-PPM con técnicas PWM (*Pulse Width Modulation*) [Rajagopal12]. La tercera propuesta del estándar y más novedosa, fue la conocida como CSK (*Color Shift keying*) [Rajagopal12, Bo12], la cual respalda la consecución de tasas hasta 96 Mb/s, y consiste básicamente en crear una constelación dividiendo el espectro de color, definido por la norma CIE1931, en 7 bandas donde se especifican las longitudes de onda utilizadas para transmitir símbolos de tres bits. Estos colores, que se generan mediante la combinación de tres LED RGB, se escogen de modo que se garantice que su centroide sea una luz blanca (para iluminación), obtenida mediante la composición de colores. Se han propuesto constelaciones de 4, 8 y 16 colores, siendo necesario seleccionar cuidadosamente la constelación de colores a emplear [Drost10, Monteiro12]. Aunque el esquema de modulación CSK introducido en el estándar IEEE 802.15.7 sólo contempla sistemas VLC en aplicaciones de un único usuario, investigaciones recientes han sugerido un nuevo esquema de modulación CSK que soporta aplicaciones multiusuario (MU-CSK, *MultiUser-CSK*) [Luna-Rivera14].

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

2.2. Características generales de los sistemas de comunicaciones ópticas no guiados en interiores.

Todo sistema de comunicaciones consta de una fuente de señal, un canal y un receptor de información. En el caso de las comunicaciones ópticas no guiadas, existen diferentes posibilidades para cada uno de ellos. Por lo tanto, para estudiar sus características se parte de un diagrama de bloques formado por:

Una fuente óptica, formada básicamente por el emisor óptico (diodo LED o láser), que puede incorporar una lente para aumentar su directividad, además de los circuitos de excitación necesarios para llevar al emisor a su punto de trabajo.

Un circuito receptor formado por un fotodiodo al que se le puede incorporar también una lente o concentrador para aumentar la potencia óptica recibida, y una cadena de amplificación (preamplificador y amplificador).

Y por último, el canal de comunicaciones, atmosférico, que puede incluir la presencia de superficies reflectoras.

2.2.1. Fuentes de señal.

Una fuente de señal está formada por un codificador, un modulador y un emisor óptico.

Los sistemas de transmisión más extendidos se pueden dividir en dos subgrupos principales: sistemas que trabajan en banda base y sistemas paso banda. En ambos casos se realiza una transformación de la señal binaria original para aprovechar mejor las propiedades del canal. Para el primer grupo es más exacto hablar de codificación que de modulación, ya que en sistemas con portadora se supone que no se trata de la portadora óptica, sino de una portadora eléctrica a la que se superpone la señal.

En banda base, la codificación más sencilla es OOK [Barry91, Chen91, Kahn94, Audeh95], en la que la señal binaria ataca directamente al emisor óptico. Si se introduce un codificador, los sistemas más extendidos son *L*-PPM, en los que la información se transmite según la posición del pulso dentro de una palabra de longitud *L* [Barry94, Chen94a, Chen94b, Moreira93, Moreira94a-d, IrDA, Tsaor94, Veldi95, Audeh96]. Han surgido multitud de trabajos que hacen uso de esquemas OOK o PPM modificados o que introducen codificación para tratar de mejorar las prestaciones de los esquemas PPM más básicos [Chen94c, Pérez-Jiménez96a, Park96, Park98, Shiu98, Ohtsuki99, García-Zambrana01, García-Zambrana03, Park01b]. Otros trabajos exponen métodos CDMA (*Code Division Multiple Access*) de acceso al medio en conjunción con técnicas de modulación PPM [Elmirghani95, Chan96, Ohtsuki00]. Existen también diversos artículos que comparan las prestaciones de los sistemas OOK y PPM en función de las interferencias y la dispersión por multipropagación, observándose normalmente

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

un mejor desempeño de la segunda alternativa [Narasimhan96, Elmirghani97, Chan98]. Asimismo, han aparecido otros métodos de modulación como DPIM (*Digital Pulse Interval Modulation*) [Ghassemlooy98] o AB-QAM (*Adaptively Biased Quadrature Amplitude Modulation*) [Hranilovic99].

También se han propuesto sistemas con subportadora eléctrica, que permiten un mejor aprovechamiento del espectro, si bien presentan complicaciones adicionales en el diseño del circuito emisor. Como alternativas fundamentales se han utilizado varios esquemas derivados del modelo QPSK básico. Éstos son OQPSK [Kato93], FQPSK [Pérez-Jiménez96b], GMSK [Pérez-Jiménez00] y MSM (*Multiple Subcarrier Modulation*) [Carruthers96, Chayat93a, Chayat93b, Kahn95, Kahn97]. Además, se han propuesto algunas aplicaciones basadas en espectro ensanchado, entre ellas cabe destacar las realizadas por la Universidad de Leeds [Wong00, Wong03], la Universidad Politécnica de Madrid [Vento98, Vento99] y la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria [Delgado00-04, Rabadán00-04].

El diseño de emisores y receptores ópticos para este tipo de sistemas se basa en trabajos realizados inicialmente por S.D. Personick [Personick73], y J.E. Goell [Goell74a, Goell74b], continuados por J.L. Hullet [Hullet81] y T.V. Muoui [Muoi83]. Con posterioridad, se produjeron nuevas aportaciones, emanadas de los grupos formados en las Universidades de California-Berkeley [Barry90], Georgia-Tech [Barry94], y en empresas como British Telecom [McCullagh94a, McCullagh94b], Siemens y Hamamatsu, que se refieren a sistemas con velocidad de transmisión más allá de los 100 Mb/s. Grupos de la Universidad Politécnica de Madrid [Santamaría94] y la Universidad Tsing-Hua de Taiwán [Chen92, Chen94a, Chen94b, Tsaur94] también trabajan en esta línea. Igualmente, en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria se han realizado Tesis Doctorales [Melían97] y Proyectos de investigación enmarcados en dicha línea.

Para mejorar las prestaciones de los enlaces ópticos no guiados, principalmente obtener una mayor eficiencia en potencia, reducir las pérdidas por propagación y minimizar el efecto de la dispersión temporal por multitraectoria, lo cual limita la máxima velocidad de transmisión, en muchas aplicaciones suele hacerse uso de estructuras de transmisores que presenten múltiples lóbulos de emisión (*spot-diffusing transmitter*) [Yun92]. En este sentido, se han propuesto dos formas prácticas para obtener este tipo de transmisores: mediante difusores holográficos [Pakravan97, Akhavan00a, Akhavan00b, Jivkova00, Jivkova01, Akhavan02a, Akhavan02b, Kavehrad03, Jivkova04, Al-Ghamdi04a, Al-Ghamdi04b] o mediante combinación de varios diodos láser (LD, *Laser Diode*) emitiendo en diferentes direcciones [Kahn97, Kahn98, Tang96, Carruthers00, Djahani00].

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

Tabla 2-1. Comparación entre fotodetectores PIN y APD.

Características	Símbolo	Unidad	Fotodetector	
			PIN (Si)	APD (Si)
Ancho espectral	λ	nm	400-1100	0,4-1,1
Responsividad	R	A/W	0,4-0,6	80-130
Ganancia	M	-		150-250
Eficiencia cuántica	η	%	65-90	77
Factor- k	k_A	-		0,02-0,05
Corriente de oscuridad	I_d	nA	1-10	0,1-1
Tiempo de subida	T_r	ns	0,5-1	0,1-2
Capacidad	C_d	pF	1,2-3	1,3-2
Ancho de Banda	Δf	GHz	0,3-0,6	0,2-1
Voltaje de polarización	V_b	V	45-100	200-250

2.2.2. Receptores.

En lo que se refiere al receptor, éste comprende un receptor óptico (con su circuitería asociada), eventualmente un ecualizador y un demodulador, y un decodificador.

Un receptor óptico básico consta de un dispositivo sensor de radiación óptica y una etapa adicional de amplificación. El dispositivo sensor puede ser del tipo fotoconductor o fotovoltaico y se encarga de realizar la conversión de potencia luminosa a corriente eléctrica (o tensión). Los fotodiodos más utilizados son los fotodiodos PIN y los de avalancha o APD, cuya comparación se muestra en la Tabla 2-1. En los receptores ópticos de detección directa en condiciones de ruido *shot* bajo, debido a iluminación ambiente, los APD son una buena elección ya que presentan una ganancia interna que hace que el nivel de señal se vea incrementado respecto al ruido térmico del preamplificador, con una consiguiente mejora de la SNR (*Signal Noise Ratio*). Por el contrario, cuando el ruido *shot* inducido por la iluminación ambiente es dominante, el uso de APD da lugar a una reducción de la SNR, debido a que la naturaleza aleatoria de su ganancia interna incrementa la varianza del ruido *shot* por un factor mayor que la ganancia aplicada a la señal. Como desventajas adicionales de los APD, hay que indicar su alto coste, la dependencia de su ganancia con la temperatura y que requieren de tensiones de polarización elevadas.

Los receptores ópticos suelen emplear técnicas de filtrado óptico para reducir los efectos de la iluminación ambiental. Existen fundamentalmente dos técnicas de filtrado óptico: el filtrado de banda ancha, basado en el fenómeno de la absorción, y el filtrado de banda estrecha, basado en el fenómeno de la interferencia óptica. Los filtros de absorción son los más sencillos y baratos de

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

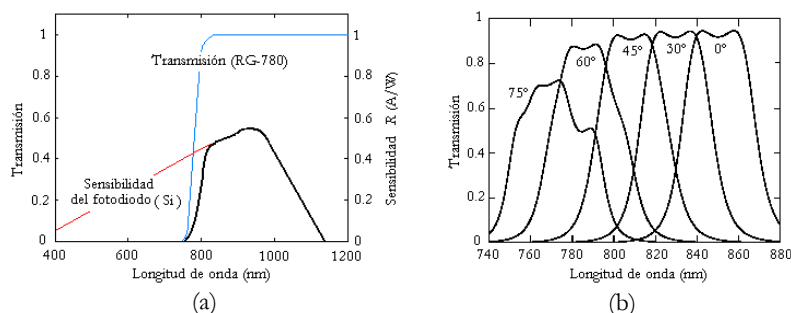


Figura 2.1. (a) Sensibilidad de un fotodiodo de silicio, transmisión de un filtro óptico de absorción (Schott RG-780) y respuesta equivalente filtro-silicio. (b) Transmisión de un filtro de interferencia de 25 capas y tres cavidades para diferentes ángulos de incidencia [Kahn97].

realizar. Estos filtros se construyen con cristal o plástico coloreado cuyas propiedades de absorción varían con la longitud de onda de la radiación incidente y se mantienen invariantes con respecto al ángulo con el que la radiación incide sobre ellos. La Figura 2.1(a) muestra la curva de transmisión de uno de estos filtros superpuesta a la curva de sensibilidad típica de un fotodiodo de silicio. La combinación de ambos exhibe una respuesta óptica paso banda que resulta adecuada para que el receptor trabaje en un enlace IR, es decir, en la banda de 780 – 950 nm. La utilización de filtros de absorción es apropiada para aplicaciones que emplean emisores tipo LED, cuya anchura espectral de emisión es amplia. No obstante, cuando en transmisión se emplean fuentes de banda estrecha, como los diodos láser, el tipo de filtrado más apropiado es el de interferencia.

Los filtros de interferencia, o de Fabri-Perot, suelen estar contruidos con múltiples capas delgadas de material dieléctrico. Éstos pueden alcanzar anchos de banda estrechos dando lugar a un mayor rechazo a la iluminación ambiente que los anteriores. Sin embargo, en orden a maximizar la SNR, el uso de estos filtros supone utilizar emisores cuyo espectro óptico caiga dentro de su ancho de banda, lo cual supone la utilización de LD. La Figura 2.1(b) muestra el espectro de transmisión de un filtro de interferencia típico para comunicaciones IR. En dicha figura, se puede observar el desplazamiento de la curva a longitudes de onda más cortas cuando se incrementa el ángulo con el que incide la radiación. Junto a este desplazamiento se produce, además, una variación de la forma y anchura de la respuesta del filtro. Este hecho se debe tener en cuenta cuando se desea que el receptor abarque grandes campos de visión o FOV (*Field Of View*).

Un receptor óptico detecta una potencia óptica proporcional a su área de colección efectiva de luz, la cual es proporcional a su área física activa. Puesto que en los enlaces difusos, es decir, No-LOS y no directos, la densidad superficial de

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

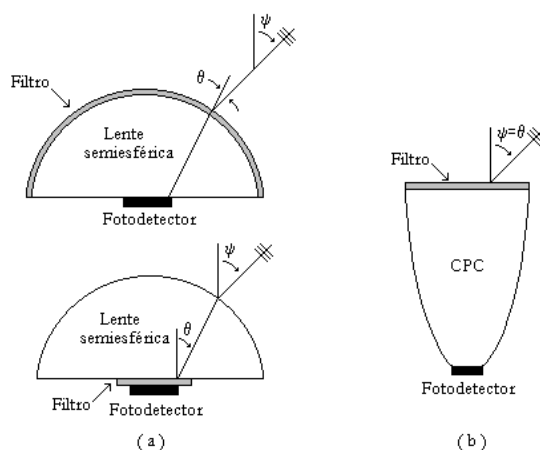


Figura 2.2. Concentradores no formadores de imagen. (a) Lente semiesférica con filtro óptico semiesférico y plano. (b) CPC con filtro óptico plano.

la potencia óptica recibida es reducida, resulta imprescindible buscar diseños de receptores que permitan maximizar el nivel de potencia óptica detectada. Incrementar el área física del fotodiodo es caro, incrementa la capacidad parásita del detector, lo que disminuye el ancho de banda de recepción e incrementa el ruido térmico del receptor, que unido al ruido *shot* generado por las fuentes de iluminación, degrada la SNR [Kahn97]. El uso de concentradores permite incrementar el área efectiva de detección del receptor sin necesidad de aumentar su área física. Existen dos tipos de concentradores, los formadores de imagen y los no formadores de imagen, siendo éstos últimos los más comúnmente utilizados hasta ahora en la mayoría de los enlaces IR de corto alcance. Los dos concentradores no formadores de imagen más utilizados son la lente semiesférica y el concentrador parabólico compuesto (*Compound Parabolic Concentrator*, CPC).

La lente semiesférica permite alcanzar un campo de visión próximo a 90° . Si se usa con un filtro paso banda de interferencia, éste suele situarse entre la lente y el detector, Figura 2.2(a). La radiación que llega al filtro lo hace con un ángulo de incidencia menor que si estuviera localizado en la superficie de la misma, minimizando el desplazamiento en longitud de onda que presenta la curva de transmisión del filtro con el ángulo de incidencia. El CPC permite alcanzar mayores ganancias que la lente semiesférica pero a expensas de presentar campos de visión menores. En este caso, los filtros se colocan en la superficie de entrada del concentrador, Figura 2.2(b), ya que su pequeño FOV restringe el ángulo de incidencia de la radiación sobre los mismos evitando el efecto del desplazamiento espectral de las curvas de transmisión.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

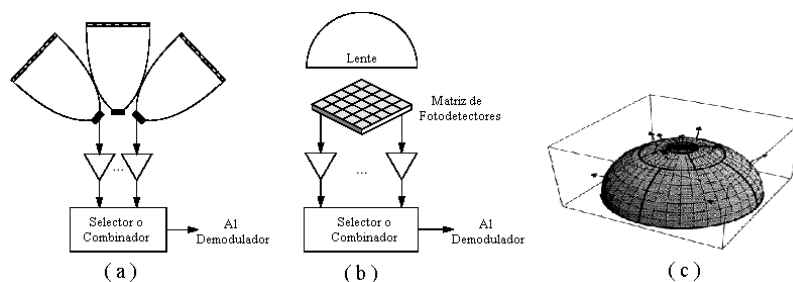


Figura 2.3. Receptores en diversidad angular. (a) Receptor basado en múltiples fotodiodos orientados en diferentes direcciones [Kahn97]. (b) Receptor basado en una matriz de fotodiodos [Kahn97]. (c) Receptor sectorizado [Valadas94].

Al igual que para los emisores, para obtener una mayor eficiencia en potencia y minimizar el efecto de la dispersión por multipropagación, se suelen utilizar estructuras de receptores que usan diversidad angular (Figura 2.3). Un receptor en diversidad angular utiliza múltiples elementos receptores para recibir la señal proveniente de diferentes direcciones. Básicamente existen tres formas de conseguir detección en diversidad angular: usando un receptor basado en múltiples fotodiodos (equipados con concentradores no formadores de imagen) orientados en diferentes direcciones [Kahn97, Pakravan98a, Pakravan98b, Carruthers00, Akhavan00a, Akhavan00b, Jivkova00, Jivkova01, Akhavan02a, Akhavan02b, Kavehrad03, Jivkova04, Al-Ghamdi04a, Al-Ghamdi04b, Rodríguez03a, Rodríguez13c], mediante un receptor basado en una matriz de fotodiodos situados en el plano focal de una lente formadora de imagen [Yun92, Tang96, Kahn98, Djahani00], o a través de un receptor sectorizado, es decir, un conjunto de fotodiodos dispuestos de forma semiesférica [Valadas94, Lomba95, Alves00a, Alves00b, Mendoza04, Mendoza05].

Las bases del diseño de los receptores ópticos fueron sentadas por Personick en 1973 [Personick73]. En principio, estos trabajos se referían a sistemas guiados, si bien posteriormente Gfeller [Gfeller79] aplicó esta teoría básica a comunicaciones no guiadas. Las diferencias entre estos dos enfoques provienen del hecho de considerar el ruido ambiente de distintas fuentes ópticas presentes en entornos de oficina, y dar un límite para la velocidad de transmisión en función de las dimensiones del recinto. Las topologías a emplear en el diseño de receptores pueden agruparse de acuerdo con la siguiente clasificación [Melían97, Alexander97]:

Amplificadores de alta impedancia: se caracterizan por presentar la mejor sensibilidad e inmunidad frente al ruido. Por el contrario, precisan de una equalización posterior debido a que integran la señal que reciben y presentan un

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

margen dinámico pequeño. Son útiles cuando el parámetro restrictivo es el ruido ambiente.

Amplificadores de baja impedancia: presentan un elevado ancho de banda y un amplio margen dinámico, si bien su sensibilidad es deficiente. Se aplican en diseños de transmisores de alta velocidad y entornos de bajo nivel de ruido.

Amplificadores de transimpedancia: constituyen una solución de compromiso para mejorar la sensibilidad, manteniendo el ancho de banda y el margen dinámico. Usan un bucle de realimentación (transimpedancia) que puede ser pasivo (una resistencia), activo (con microFET o integrador y capacidad) o una realimentación óptica.

Amplificadores con circuito resonante: su filosofía de diseño es similar a los sistemas heterodinos convencionales. Se diseñan para mejorar la relación señal a ruido en una banda determinada, para lo que se utiliza un circuito resonante o tanque.

Amplificadores con bobina de entrada: consiste en utilizar una topología como las descritas anteriormente y añadirle a la entrada un elemento inductor (bobina) de tal forma que se aprovechen las características en cuanto a sensibilidad de la etapa amplificadora y se aumente el ancho de banda del sistema. Su utilización se recomienda para sistemas de muy alta velocidad.

Es de destacar que estas dos últimas topologías presentan elevada inestabilidad y dificultad de sintonización, lo que hace que deban ser descartadas en muchas aplicaciones. En la Figura 2.4 se muestran las dos configuraciones más predominantes que los receptores ópticos utilizan como preamplificadores: el de transimpedancia y el de alta impedancia de entrada. El de transimpedancia es el más utilizado puesto que permite un gran rango dinámico, una alta sensibilidad y un gran ancho de banda sin necesidad de ecualización. En ambas configuraciones, la capacidad del fotodiodo y la impedancia equivalente de entrada del dispositivo activo forman un filtro paso bajo con un polo simple. Para el de transimpedancia, la componente resistiva que interviene en el filtro disminuye en un factor próximo al valor de la ganancia en lazo abierto A , lo cual permite su utilización a altas velocidades o en su defecto, conectar fotodiodos de gran área y por tanto, de mayor capacidad.

Como etapa de entrada, los amplificadores hacen uso de transistores de efecto campo FET (*Field Effect Transistor*), o transistores bipolares de unión BJT (*Bipolar Junction Transistor*). El uso de transistores FET permite alcanzar niveles de ruido menores que los BJT, sin embargo, estos últimos son más eficientes en cuanto al consumo de potencia.

Una de las maneras tradicionales de mejorar la probabilidad de error de un sistema de comunicaciones que trabaja en un medio muy dispersivo, y que se ve

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

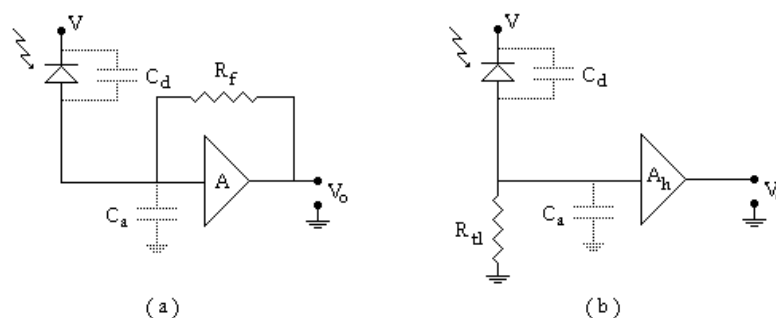


Figura 2.4. Preamplificador de transimpedancia (a) y de alta impedancia (b).

afectado por fenómenos como la multipropagación y el *jitter*, consiste en introducir un dispositivo que disminuya la influencia de la función de transferencia del canal sobre la señal recibida. Los sistemas de equalización tratan de estimar la función de transferencia del canal (de forma estática o adaptativa) y, mediante operaciones de filtrado, eliminar su efecto y así realizar una detección subóptima sobre la señal recibida. De las diversas estructuras de equalización, la que más extensamente ha sido estudiada es la DFE (*Decision Feedback Equalizer*), que se compone de dos filtros (en general FIR), uno directamente sobre la señal recibida (*forward*) y otro de realimentación (*backward*), además de un decisor, el cual puede soportar decisión binaria o por bloques, en cuyo caso al equalizador se le suele denominar BDFE (*Block-Decision Feedback Equalizer*) [Barry94, Lee99].

2.2.3. Fuentes de ruido en el canal óptico no guiado.

Los sistemas de transmisión ópticos no guiados están afectados por dos fuentes de ruido dominantes: el ruido debido a la iluminación ambiental presente en el recinto en el que se establece la comunicación, y por el ruido térmico producido por los componentes resistivos existentes en la etapa de preamplificación.

2.2.3.1. Fuentes de iluminación ambiental.

La iluminación ambiental constituye la principal fuente de ruido en los sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricas. En la mayoría de las aplicaciones, los enlaces operan en presencia de una alta radiación infrarroja y luz visible procedentes de las diferentes fuentes de iluminación ambiental presentes en el entorno, y a las que son sensibles los fotodetectores. El efecto de la iluminación ambiental sobre los sistemas ópticos de interior y, en particular, en sistemas con diversidad angular es un tema que se ha estudiado extensamente en

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

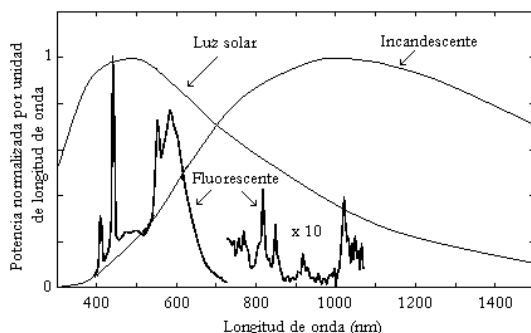


Figura 2.5. Densidad espectral de potencia normalizada de distintas fuentes de iluminación.

las últimas décadas [Kahn97, Tavares95, Boucouvalas96, Sterckx00, Al-Ghamdi03, Al-Ghamdi04a].

Las fuentes de luz naturales y artificiales producen una cierta cantidad de densidad de potencia óptica o irradiancia que degrada las prestaciones de los receptores ópticos. Sus efectos se manifiestan en el receptor de dos formas: mediante ruido *shot* inducido sobre el fotodetector debido a la irradiancia de fondo constante, y como interferencias eléctricas debidas a las variaciones temporales de su intensidad.

La iluminación procedente de la luz solar, las lámparas incandescentes y las fluorescentes, y recientemente las lámparas LED, constituyen las principales fuentes de luz que contaminan el ambiente con radiación infrarroja y visible. En la Figura 2.5 se representa la distribución espectral de las tres fuentes de luz ambiental enumeradas en primer lugar [Kahn97, Gfeller79].

La fuente principal, la luz natural procedente del sol, supone una fuente de ruido no modulada con un pico espectral alrededor de los 450 nm. La luz artificial que producen las lámparas incandescentes y fluorescentes es una luz menos intensa que la natural pero, a diferencia de ésta, sus emisiones cambian rápidamente al ritmo que marca la frecuencia de la red de alimentación. Las lámparas incandescentes tienen componentes de longitudes de onda entre los 400 y los 1400 nm, y producen interferencias con componentes de frecuencia entre los 50 Hz y los 2 kHz. Peores efectos produce la iluminación de las lámparas fluorescentes, con componentes entre los 780 y 950 nm, introduciendo interferencias con componentes de frecuencia desde los 50 Hz a los 300 kHz, llegando a extenderse en algunas ocasiones hasta 1 MHz [Moreira95, Moreira96, Narasimhan96]. En cualquier caso, las señales interferentes que provoca la luz artificial se pueden eliminar mediante un filtrado eléctrico paso alto en el receptor. No obstante, esta operación de filtrado debe ir acompañada de una elección adecuada del esquema de señalización empleado, que no debe presentar

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

aportaciones significativas a baja frecuencia, para no degradarse en el proceso de filtrado. En este sentido, esquemas del tipo bipolar RZ (*Return to Zero*) o Manchester NRZ (*Non Return to Zero*), que tienen una menor aportación en baja frecuencia, serían los más apropiados [García-Zambrana99].

Incluso con el uso de filtros ópticos, la corriente continua generada en el fotodetector, I_{DC} , debida a la iluminación por fuentes naturales o artificiales, es muy superior a la señal deseada. Esta fotocorriente es proporcional a la potencia total de luz captada y es la responsable de la aparición del ruido *shot* en el receptor. Los transmisores del sistema óptico también pueden contribuir a la formación de I_{DC} y, en consecuencia, a la generación de ruido *shot*. No obstante, dadas las elevadas pérdidas existentes en los enlaces ópticos y los niveles de potencia emitidos, la irradiancia que producen los transmisores es tan pequeña, a estos efectos, que se pueden despreciar. Por tanto, se puede suponer, que el ruido *shot* producido en el fotodetector se debe únicamente a luz ambiental. Debido a su alta intensidad, el ruido *shot* puede ser modelado como Gaussiano blanco aditivo (*Additive White Gaussian Noise*, AWGN), estacionario e independiente de la señal transmitida, con una densidad espectral de potencia unilateral que sigue la expresión [Kahn97, Samaras98]:

$$S_{shot}(f) = 2qI_{DC} = 2qRP_{amb} \left[\frac{A^2}{Hz} \right] \quad (2.1)$$

donde q es la carga del electrón, R la responsividad del fotodetector (A/W) y P_{amb} es la potencia óptica media recibida debido al ruido procedente de la luz ambiental.

Una vez conocida la densidad espectral de potencia del ruido *shot*, la varianza de corriente del ruido *shot* referido a la entrada del receptor se obtiene integrando S_{shot} en el rango de frecuencias de trabajo del receptor, es decir,

$$\sigma_{shot}^2 = \frac{1}{J_0^2} \int_0^\infty S_{shot}(f) |J(f)|^2 df \quad [A^2] \quad (2.2)$$

donde la función $J(f)$ representa la respuesta en frecuencia del circuito receptor y J_0 es el valor máximo de su amplitud. Esta expresión se puede expresar de forma más compacta haciendo uso del concepto de ancho de banda equivalente de ruido del receptor, definido del siguiente modo [Keiser00]:

$$B_n = \frac{1}{J_0^2} \int_0^\infty |J(f)|^2 df \quad [Hz] \quad (2.3)$$

Con este ancho de banda, el cálculo de la varianza de ruido *shot* se reduce a multiplicar la densidad espectral de potencia de ruido de la ecuación (2.1) por B_n , de la forma:

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

$$\sigma_{shot}^2 = 2qRP_{amb}B_n \quad [A^2] \quad (2.4)$$

Dado que el ancho de banda equivalente de ruido, depende de la respuesta del receptor que, a su vez, viene determinada por el régimen binario de la señal transmitida R_b , de modo que, a mayor velocidad de transmisión, mayor es el B_n . En la bibliografía, se suele expresar B_n en función de R_b como $B_n = I_2 R_b$, donde I_2 es una constante que depende del filtrado eléctrico empleado [Smith82].

En la ecuación (2.4), los parámetros R y B_n dependen del diseño del receptor, mientras que, P_{amb} depende fundamentalmente de las condiciones de iluminación de la sala. En el caso de considerar que el receptor emplee un filtro de banda estrecha para rechazar la luz ambiental, con una anchura de $\Delta\lambda$, centrada en la longitud de onda λ_0 , la potencia óptica media de luz ambiental recibida, viene dada por [Kahn97]:

$$P_{amb} = p_n(\lambda_0) T_f(\lambda_0) \Delta\lambda A_{ef} \quad [W] \quad (2.5)$$

donde $p_n(\lambda)$ es la irradiancia espectral incidente de la fuente de luz [$W/cm^2/nm$], A_{ef} es el área efectiva del fotodetector, y $T_f(\lambda)$ es el factor de transmisión del filtro, cuyo valor está comprendido entre 0 y 1.

Considerando lo mencionado anteriormente, la expresión de la varianza de ruido $shot$ queda como:

$$\sigma_{shot}^2 = 2qRP_{amb}I_2R_b \quad [A^2] \quad (2.6)$$

2.2.3.2. Ruido térmico.

Cuando no hay luz ambiental o ésta es escasa, la fuente de ruido dominante es el ruido interno del receptor, o ruido térmico, que depende principalmente de la tecnología empleada en la etapa de amplificación. Éste también puede ser modelado como AWGN e independiente de la señal, aunque a menudo no sea blanco [Hollenhorst95]. Para una densidad espectral de potencia dada por $S_{térmico}$ [A^2/Hz] y un ancho de banda B_n , la varianza de ruido térmico vendrá dada por:

$$\sigma_{térmico}^2 = S_{térmico} B_n \quad [A^2] \quad (2.7)$$

Para poder evaluar la influencia del ruido interno se hace necesario fijar de antemano una determinada estructura de recepción. En este sentido destaca la configuración empleada por Kahn [Kahn97], en la que se asume el uso de fotodetectores PIN y una etapa preamplificadora de transimpedancia construida con tecnología FET. La Figura 2.6 muestra un esquema simplificado de dicha etapa. Considerando que el amplificador de ganancia A_2 es ideal, el circuito presenta una respuesta con un polo simple con frecuencia de corte a 3 dB, dada por:

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

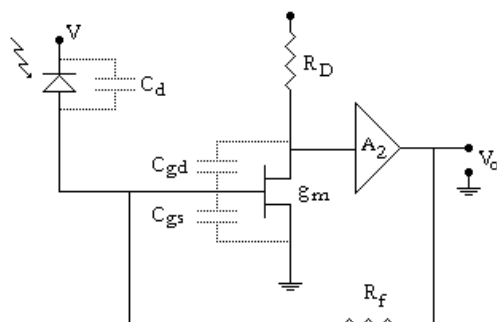


Figura 2.6. Esquema simplificado de un preamplificador de transimpedancia con circuito activo basado en un transistor FET [Kahn97].

$$f_{-3dB} = \frac{G}{2\pi R_f C_T} = \frac{g_m R_D A_2 + 1}{2\pi R_f C_T} \tag{2.8}$$

donde la capacidad de entrada total $C_T = C_d + C_g = C_d + C_{gs} + C_{gd}$, está normalmente dominada por la capacidad del fotodiodo, C_d , frente a la capacidad de puerta, C_g , debido a que se requiere de un área de detección grande para obtener SNR elevadas.

En estas condiciones, la densidad espectral de potencia de ruido térmico referido a la entrada de este preamplificador, viene dada por:

$$S_{termico}(f) = \frac{4k_b T}{R_f} + \frac{16\pi^2 k_b T}{g_m} \left(\Gamma + \frac{1}{g_m R_D} \right) C_T^2 f^2 + \frac{4\pi^2 K I_D^a C_T^2 f}{g_m^2} \tag{2.9}$$

donde el primer término representa el ruido térmico que introduce la resistencia de realimentación del circuito preamplificador. Aquí, k_b es la constante de Boltzmann, T la temperatura absoluta en K y R_f la resistencia de realimentación. Este término se puede minimizar si se eligen valores elevados para esta resistencia. El segundo término de la ecuación (2.9) describe el ruido blanco de la resistencia de canal del transistor FET, siendo, en este caso, Γ el factor de ruido del canal, g_m la transconductancia, C_T la capacidad total de entrada y R_D la resistencia de polarización. Este término sufre un incremento proporcional a f^2 por lo que se convierte en una fuente de ruido dominante cuando las tasas de transmisión son elevadas. Su efecto se minimiza al disminuir la capacidad total C_T , o lo que es lo mismo, la capacidad dominante del fotodetector, C_d . Finalmente, el tercer y último término, que también es proporcional a f , cobra especial relevancia, convirtiéndose en una contribución importante, cuando las velocidades de transmisión son elevadas. Este término describe el ruido $1/f$ del canal del FET, donde K y a son los coeficientes del ruido $1/f$, e I_D es la corriente

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

de oscuridad. Su efecto se vería disminuido para C_T pequeñas, g_m elevadas y transistores FET con K pequeñas.

Considerando lo anterior, la densidad espectral de potencia de ruido total a la entrada del receptor, $S_{total}(f)$, se puede expresar como la suma de las contribuciones debidas al ruido *shot* y al térmico, es decir:

$$S_{total}(f) = S_{shot}(f) + S_{térmico}(f) \quad (2.10)$$

De este modo, siguiendo con las pautas marcadas por Smith y Personick [Personick73, Smith80, Smith82], para un receptor constituido por un único fotodetector, un filtro eléctrico en recepción, y operando en un enlace digital con un régimen binario o tasa de bit R_b , la varianza de ruido total referido a la entrada, σ_{total}^2 viene dada por la suma de las contribuciones debidas al ruido *shot* (σ_{shot}^2) y al térmico ($\sigma_{térmico}^2$):

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{térmico}^2 \quad (2.11)$$

donde la varianza de ruido *shot* es la obtenida en la ecuación (2.6), y la varianza correspondiente al ruido térmico, se obtiene sustituyendo en (2.7) el cálculo de $S_{térmico}(f)$ obtenido en (2.9), de modo que la ecuación (2.11) puede expresarse como

$$\begin{aligned} \sigma_{total}^2 = & 2qRP_{amb}I_2R_b + \frac{4kT}{R_f}I_2R_b + \frac{16\pi^2kT}{g_m}\left(\Gamma + \frac{1}{g_mR_D}\right)C_T^2I_3R_b^3 + \\ & + \frac{4\pi^2KI_D^aC_T^2}{g_m^2}I_fR_b^2 \end{aligned} \quad (2.12)$$

donde I_2 , I_3 e I_f son constantes que sirven para relacionar el ancho de banda equivalente de ruido del receptor, B_n , con el régimen binario R_b , y sus valores dependen de la forma del pulso empleado [Smith82]. En esta expresión se observa que el ruido *shot*, correspondiente al primer término, y el ruido debido a la resistencia R_f , presentan varianzas de ruido proporcionales a la tasa de bit, R_b , mientras que el ruido térmico en el canal del FET y el ruido $1/f$, cuyas densidades espectrales de potencia son proporcionales a f^2 y f , presentan varianzas proporcionales a R_b^3 y R_b^2 , respectivamente. En la Figura 2.7 se representan estas contribuciones a la varianza de ruido total. Como se puede observar, el ruido *shot* es la contribución dominante hasta una tasa de bit de decenas de Mb/s, por encima de la cual el ruido interno del canal del FET se convierte en el término dominante.

Considerando despreciables las contribuciones al ruido debidas a las corrientes de fuga en la puerta del FET y el ruido $1/f$, se obtiene una expresión aproximada de la varianza de ruido total referida a la entrada [Tang96, Djahani00], dada por:

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

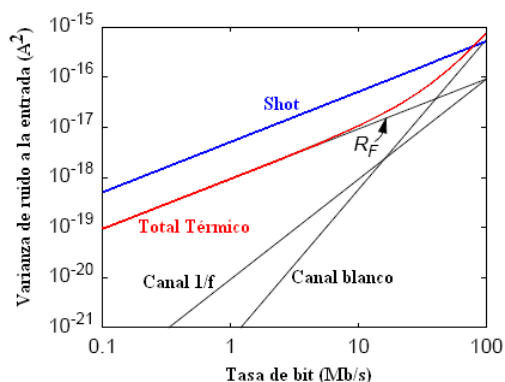


Figura 2.7. Contribuciones a la varianza de ruido total a la entrada del receptor [Kahn97].

$$\sigma_{total}^2 \approx 2qRP_{amb}I_2R_b + \frac{4kT}{R_f}I_2R_b + \frac{16\pi^2kT\Gamma}{g_m}C_T^2I_3R_b^3 \quad (2.13)$$

donde cada uno de los términos representan, respectivamente, el ruido *shot* inducido por la luz ambiental, el ruido debido a la resistencia de realimentación del circuito preamplificador y el ruido de canal del FET.

Para incluir en la expresión la dependencia con el área de detección del fotodetector, A_{det} , se suele considerar que el fotodetector presenta una capacidad constante por unidad de área η , de tal modo que $C_d = \eta A_{det}$. Asimismo, considerando que las capacidades del fotodiodo son altas, se asume que $C_d \gg C_g$ y por tanto $C_T \approx C_d$. Por otro lado, para minimizar el ruido introducido por el FET es deseable elegir una frecuencia de corte a 3dB para el preamplificador que coincida con la tasa de bit de transmisión, R_b , lo que requerirá, partiendo de la ecuación (2.8), que el valor para la resistencia de realimentación sea

$$R_f = \frac{G}{2\pi R_b C_T} = \frac{G}{2\pi R_b C_d} = \frac{G}{2\pi R_b \eta A_{det}} \quad (2.14)$$

donde G representa la ganancia en lazo abierto del amplificador de transimpedancia [Tang96], que presenta valores típicos entre 10 y 30. Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, la ecuación (2.13) se puede expresar del siguiente modo:

$$\sigma_{total}^2 \approx 2qRP_{amb}I_2R_b + \frac{4kT}{G}(2\pi\eta A_{det})I_2R_b^2 + \frac{16\pi^2kT\Gamma}{g_m}(\eta A_{det})^2I_3R_b^3 \quad (2.15)$$

A partir de este modelo de ruido, se puede deducir que el empleo de estrechos FOV junto a áreas de detección pequeñas permitirían reducir el primer

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

término de la ecuación anterior, ya que se reduciría el nivel de potencia de luz ambiental captada. El segundo y tercer término de la ecuación, se verían igualmente reducidos, ya que un área de detección pequeña supondría una reducción significativa de la capacidad de entrada al preamplificador.

2.2.4. El canal óptico no guiado en interiores.

En los enlaces ópticos inalámbricos, tanto en el infrarrojo como en el visible, la técnica de modulación viable es la modulación de intensidad (*Intensity Modulation*, IM), donde la forma de onda deseada es modulada sobre la potencia instantánea de la portadora óptica. La técnica factible de conversión óptico-eléctrica es la detección directa (*Direct Detect*, DD); en la cual, un fotodetector suministra una corriente proporcional a la potencia óptica instantánea recibida. La principal diferencia entre ambos tipos de canales ópticos radica en que, si bien la transmisión en el infrarrojo se puede considerar monocromática, su rango de longitudes de onda está en el intervalo de 780 a 950 nm, la transmisión en el canal visible es de amplio rango espectral, puesto que su rango de longitudes de onda abarca desde 380 hasta 780 nm.

El modelo del canal con IM/DD (Figura 2.8) permite analizar alguna de las características fundamentales del canal óptico no guiado. La forma de onda transmitida $X(t)$ es la potencia óptica instantánea radiada por el emisor, y la forma de onda recibida $Y(t)$, es la corriente instantánea producida por el fotodetector como resultado de integrar, sobre toda su superficie, la densidad superficial de potencia óptica instantánea en cada punto multiplicada por su sensibilidad. Afortunadamente, las áreas de los fotodetectores son mucho más grandes que la longitud de onda (miles de longitudes de onda), dando lugar a una diversidad espacial que previene el desvanecimiento por multitrayectoria, a diferencia de lo que ocurre en el canal de radiofrecuencia. Este hecho permite considerar que el canal permanece inalterado cuando el fotodetector se desplaza una distancia comparable a la longitud de onda. Sin embargo, aparecen fenómenos de dispersión por multitrayectoria debidos a las diferentes reflexiones que sufre la señal transmitida antes de llegar al receptor.

Comúnmente los sistemas de comunicaciones ópticas no guiadas con IM/DD se modelan como un sistema lineal y temporalmente invariante en banda base, donde la fotocorriente generada en el detector $Y(t)$, se puede estimar como la convolución entre la potencia óptica instantánea radiada por la fuente, $X(t)$, y la respuesta al impulso del canal $h(t)$, como:

$$Y(t) = R X(t) \otimes h(t) + N(t) + I(t) \quad (2.16)$$

donde R representa la responsividad del fotodiodo (A/W). Además, $N(t)$ e $I(t)$ representan, respectivamente, al ruido del canal que afecta a la señal transmitida

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

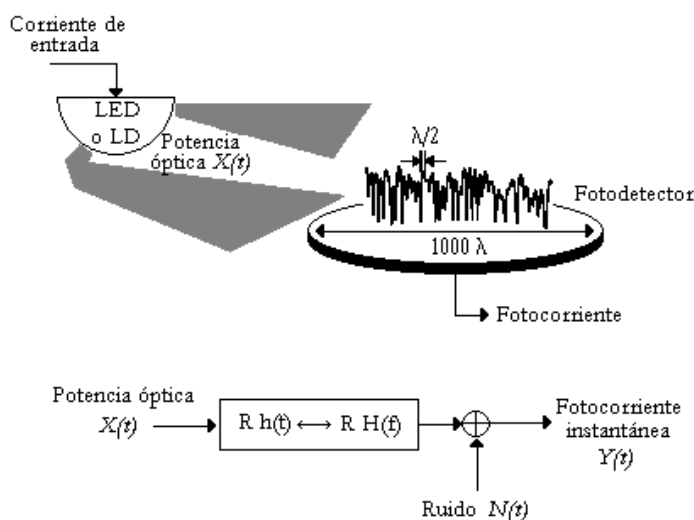


Figura 2.8. Modelo del canal óptico inalámbrico con IM/DD [Kahn97].

durante su propagación y a las interferencias producidas por fuentes de iluminación presentes en el entorno [Kahn97].

Alternativamente, el canal puede ser descrito en términos de su respuesta en frecuencia:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (2.17)$$

La respuesta al impulso del canal o respuesta en frecuencia, vendrá determinada por la posición y propiedades del transmisor y del receptor, así como de las múltiples reflexiones que se pueden producir en el entorno, generando lo que se conoce como un perfil de potencia. Asimismo, la respuesta al impulso es cuasiestática, debido a la alta velocidad de señalización, la diversidad espacial que brinda el área del fotodetector y la baja velocidad de movimiento de los objetos presentes en el canal. Los trabajos realizados destinados a lograr caracterizar el canal óptico no guiado se pueden agrupar en: medidas [Kahn95, Hashemi94a-b] y simulaciones, los cuales emplean algoritmos que se pueden clasificar en iterativos [Barry93, Pérez-Jiménez95, López-Hernández97] o estadísticos, basados en métodos de Monte Carlo y técnicas de trazado de rayos [López-Hernández00, González05a]. Si bien la mayoría de estos trabajos fueron realizados sobre radiación infrarroja, recientemente se han ido publicando los primeros estudios sobre el canal visible, donde no sólo se tiene en cuenta la distribución espectral

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

del emisor, sino también la variación de los parámetros de reflectancia de las paredes con la longitud de onda [Cui09, Lee11b, Rodríguez13a].

La entrada del canal $X(t)$, nunca puede ser negativa, pues es la potencia óptica instantánea transmitida o emitida por el emisor IR, cuyo valor medio P_t es:

$$P_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X(t) dt \quad (2.18)$$

La potencia óptica media recibida, P_r , viene dada por:

$$P_r = H(0) P_t \quad (2.19)$$

donde $H(0)$ representa la ganancia en continua (*Direct Component*, DC), del canal:

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt \quad (2.20)$$

La relación señal a ruido eléctrica recibida, SNR, en un enlace digital operando a una velocidad de transmisión R_b , se puede obtener a partir de $H(0)$ y de la varianza de ruido total referido a la entrada del receptor, σ_{total}^2 [Personick73, Smith80], como:

$$SNR = \frac{(RP_r)^2}{\sigma_{total}^2} = \frac{R^2 H^2(0) P_t^2}{\sigma_{shot}^2 + \sigma_{térmico}^2} \quad (2.21)$$

donde se ha asumido que SNR se ha obtenido para un enlace formado por un receptor constituido por un único fotodetector y un filtro eléctrico en recepción capaz de mitigar la señal interferente que provoca la luz artificial. Como se puede observar, la SNR depende del cuadrado de la potencia óptica media recibida implicando que los enlaces con IM/DD deben utilizar alta potencia óptica de transmisión, a diferencia de los canales de transmisión convencionales donde la SNR es proporcional a la primera potencia de la misma. Nótese, también, que la varianza de ruido total referido en la entrada del receptor viene dada por la suma de las contribuciones de los ruidos *shot* y térmico, que se obtienen a partir de las ecuaciones (2.6) y (2.7), respectivamente.

Parámetros que caracterizan el canal óptico inalámbrico en interiores.

Caracterizar un canal óptico no guiado supone determinar su respuesta en frecuencia o su respuesta al impulso, también denominada perfil de potencia (*delay excess profile*). El modelo más extendido para caracterizar la respuesta al impulso es el propuesto por A.M. Saleh y R. Valenzuela [Saleh87]. En éste modelo se utilizan tres parámetros para caracterizar la respuesta al impulso: el retardo medio τ_m (*mean excess delay*), la divergencia cuadrática media o dispersión

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

de retardo τ_{rms} (*rms spread delay*) y la ganancia en DC del canal, G . Las expresiones que definen estos parámetros son las siguientes [Carruthers97, Kahn95]:

$$\tau_m = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t h^2(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt} \quad (2.22)$$

$$\tau_{rms} = \left[\frac{\int_{-\infty}^{\infty} (t - \tau_m)^2 h^2(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt} \right]^{1/2} \quad (2.23)$$

$$G = H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt \quad (2.24)$$

Existen muchos trabajos que proporcionan valores para el retardo medio y la dispersión de retardo obtenidos de manera experimental o mediante simulación, para diferentes enlaces ópticos inalámbricos establecidos en ambientes de interior. En la Figura 2.9 se muestran los valores obtenidos para una respuesta al impulso de un canal IR en interiores. El retardo medio corresponde al momento de primer orden de la respuesta al impulso y la dispersión de retardo es la raíz cuadrada del momento central de segundo orden de la respuesta al impulso. Este último, representa la dispersión temporal debida a la multipropagación, o lo que es lo mismo, nos permite obtener una estimación de la interferencia entre símbolos (*InterSymbolic Interference*, ISI).

Como se ha indicado anteriormente, otro de los parámetros que se utilizan para caracterizar el canal es la ganancia en continua del canal ($H(0)$ o G). La respuesta en frecuencia del canal presenta un aspecto relativamente plano en la zona de las bajas frecuencias. En la mayoría de los casos, se utiliza el valor de la amplitud de la componente directa, $H(0)$, para caracterizar las pérdidas en el canal, la cual relaciona la potencia óptica media recibida, P_r , y transmitida, P_t : $P_r = H(0) \cdot P_t = G \cdot P_t$.

En los enlaces LOS, la ganancia en DC puede ser determinada de manera precisa considerando únicamente la línea de visión directa entre el emisor y el receptor (Figura 2.10). Supongamos que el transmisor emite con un patrón de radiación con simetría axial descrito por su intensidad de radiación $P_t \cdot R_E(\phi)$ (W/sr), en el receptor, situado a una distancia d y ángulo ϕ respecto al transmisor, la irradiancia (W/cm²) es:

$$I_s(d, \phi) = \frac{P_t R_E(\phi)}{d^2} \quad (2.25)$$

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

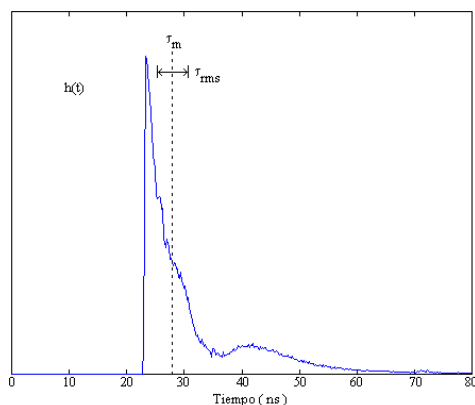


Figura 2.9. Caracterización de τ_m y τ_{rms} para una función de respuesta al impulso.

Y la potencia recibida es:

$$P_r = I_s(d, \phi) A_{ef}(\psi) = \frac{P_t R_E(\phi)}{d^2} A_{ef}(\psi) \quad (2.26)$$

De esta manera, la ganancia en DC para un enlace LOS viene dado por:

$$H(0) = \frac{P_r}{P_t} = \frac{R_E(\phi)}{d^2} A_{ef}(\psi) \quad (2.27)$$

La ganancia en DC también se suele expresar en decibelios, $10 \cdot \log H^2(0)$, y normalmente interesa que sea lo más alta posible. Como se puede observar, ésta depende directamente del patrón de radiación del emisor, del área efectiva del receptor e inversamente del cuadrado de la distancia que los separa. La inversa de la ganancia representa las pérdidas ópticas por propagación (*Path Loss*, PL):

$$PL \text{ (dB ópticos)} = -10 \log |H(0)| \quad (2.28)$$

En el cálculo de la ganancia en DC de los enlaces en quasi-difusión y en difusión hay que tener en cuenta los efectos de las múltiples reflexiones en las distintas superficies que conforman el recinto. El cálculo de la misma se debe realizar a partir de la respuesta al impulso del canal, para lo cual, se han establecido diferentes métodos: métodos analíticos [Gfeller79], métodos iterativos [Barry93, Navarro94, Pérez-Jiménez95, López-Hernández97] y métodos estadísticos [Pérez-Jiménez97, López-Hernández98a].

Sobre este tema trabajan grupos como el del Prof. Kahn en la Universidad de California-Berkeley (USA), el del Prof. Oliveira en la Universidad de Aveiro

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

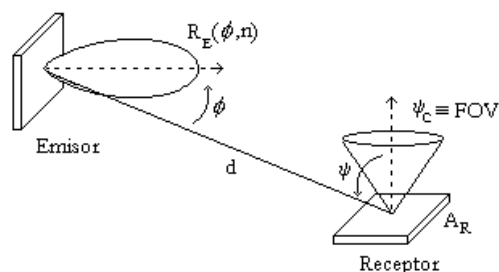


Figura 2.10. Configuración con línea de visión directa entre el emisor y el receptor.

(Portugal) y el del Prof. Hashemi en la Universidad de Sharif de Teherán (Irán), en colaboración con el *Canadian Institute for Telecommunications*. En España, actualmente, son varios los grupos que se dedican a la caracterización de canales. Entre ellos, cabe destacar al de la Universidad Politécnica de Madrid, dirigido por el Prof. López Hernández, al grupo del Prof. Puerta Notario en la Universidad de Málaga, y al grupo del Prof. Pérez-Jiménez en la Universidad de La Palmas de Gran Canaria, con el cual colabora el Prof. Rodríguez Pérez desde la Universidad de La Laguna, que es la institución en la que se ha llevado a cabo la realización de este trabajo de Tesis Doctoral.

2.2.5. Detección en diversidad angular: técnicas de combinación.

Cuando se trabaja con receptores en diversidad angular se producen tantos canales de propagación como elementos de detección tiene el receptor. Por tanto, el sistema equivalente banda base que modela el funcionamiento de un enlace con diversidad angular será una extensión del sistema modelado mediante la ecuación (2.16). Asumiendo que no existe interferencia entre canales, y considerando que se emplea un receptor en diversidad angular constituido por *J* elementos detectores, la ecuación que modela la transmisión vendrá dada por:

$$Y_j(t) = RX(t) \otimes h_j(t) + N_j(t), \quad j = 1, \dots, J \tag{2.29}$$

donde $Y_j(t)$ representa la fotocorriente de salida correspondiente al elemento *j*-ésimo del receptor, $X(t)$ es la potencia óptica transmitida, $h_j(t)$ es la respuesta al impulso del canal formado por el transmisor y el elemento detector *j*-ésimo y, por último $N_j(t)$ representa el ruido captado por el elemento *j*-ésimo del receptor. En la ecuación se ha considerado que la responsividad *R* es la misma para todos los elementos del receptor.

Las prestaciones finales del receptor en diversidad angular dependen de cómo son detectadas y procesadas las señales $Y_j(t)$ recibidas por los diferentes elementos del receptor. Existen distintas técnicas de combinación, entre las que podemos

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

Tabla 2-2. Comparación de las técnicas de combinación en receptores con diversidad angular.

Características	MLC	MRC	SB	EGC
Permite ganancias óptica altas con estrechos FOV	X	X	X	X
Disminuye el ruido y la interferencia entre canales	X	X	X	
Disminuye la dispersión por multipropagación	X	bajo ciertas circunstancias	X	
Requiere de un preamplificador				X
No requiere estimar el canal ni del ruido				X

destacar cuatro: MLC (*Maximum-Likelihood Combining*), MRC (*Maximal-Ratio Combining*), SB (*Selection Best*) y EGC (*Equal-Gain Combining*). La Tabla 2-2 resume las prestaciones que identifican a un receptor con diversidad angular según la técnica de combinación empleada [Kahn97].

De todas las técnicas de combinación posibles, la técnica óptima es la combinación por máxima probabilidad (*Maximum-Likelihood Combining*, MLC) o MFC (*Mached-Filter Combining*) [Kahn97, Carruthers00]. En ella, cada señal parcial $Y_j(t)$ recibida en cada elemento receptor j -ésimo atraviesa un filtro adaptado $h_j(-t)$ al pulso recibido en ese elemento receptor. La salida de cada filtro será muestreada y amplificada por un factor de ganancia w_j inversamente proporcional a la densidad espectral de potencia de ruido, $N_j(t)$, existente en ese elemento receptor. La suma de todas las contribuciones da lugar a la señal combinada, de la que se extraerá, en las etapas posteriores de recepción, la información recibida. El principal inconveniente de MLC es su alta complejidad de implementación, ya que requiere de la estimación de las J respuestas al impulso del canal para poder obtener las respuestas de los J filtros adaptados, así como, estimar las densidades espectrales de ruido recibidas. Este hecho, hace que no sea la técnica más apropiada para la mayoría de las aplicaciones. Existen otras técnicas de combinación más sencillas, que aunque también se basan en un promediado, utilizan distintos criterios a la hora de escoger los valores de los pesos w_j . En estos métodos, en lugar de emplear un banco de filtros adaptados se suele emplear un único filtro paso bajo común para todas las ramas o elementos de detección [Carruther00], con una frecuencia de corte acorde con el régimen binario empleado.

Independientemente de la técnica de combinación empleada para elegir los pesos w_j de cada elemento receptor, la expresión que define la SNR a la salida de cada elemento receptor j -ésimo y la expresión general de la SNR combinada a la salida de un receptor con diversidad angular se pueden expresar como [Al-Ghamdi04b]:

$$SNR_j = \frac{(RP_{r,j})^2}{\sigma_{total,j}^2} \quad (2.30)$$

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

$$SNR = \frac{\left(\sum_{j=1}^J (w_j R P_{r,j}) \right)^2}{\sum_{j=1}^J w_j^2 \sigma_{total,j}^2} \quad (2.31)$$

donde $P_{r,j}$ y $\sigma_{total,j}^2$ representan, respectivamente, la potencia óptica media recibida por el j -ésimo elemento fotodetector y la varianza total de ruido presente en dicho elemento fotodetector.

En la técnica de combinación MRC (*Maximal-Ratio Combining*), las señales $Y_j(t)$ se suman con pesos w_j proporcionales a la relación entre la corriente de señal y la varianza de ruido a la salida de cada fotodetector de forma que maximicen la SNR total. De este modo, se concede mayor importancia a las señales recibidas con mejor calidad. Cuando la dispersión por multipropagación no es significativa, el método óptimo MLC equivale al MRC, como se ha demostrado en simulaciones realizadas para enlaces difusos a baja velocidad de transmisión, donde el uso de la técnica de combinación MRC permite reducir la potencia de transmisión entre 4 y 6 dB [Tavares95]. Además, en las situaciones en las que la señal deseada y el ruido ambiental proceden de direcciones distintas, el método MRC puede disminuir la distorsión por multipropagación frente a la utilización de un receptor basado en un único elemento de detección con un amplio FOV. Pero si éste no es el caso, la dispersión por multipropagación puede ser significativa y dado que el método MRC requiere estimar la SNR para cada uno de los J elementos detectores, supondría un sustancial incremento de complejidad en comparación con esquemas de recepción sin diversidad.

Para obtener el valor de los pesos w_j que se deberá aplicar a la señal de salida de cada elemento detector, se deben calcular las J derivadas parciales de la SNR total con respecto a cada uno de los w_j , donde $j = 1, \dots, J$, e igualarlas a cero. Así, derivando la expresión (2.31) con respecto a w_j e igualando a cero, se obtienen los valores de los pesos w_j que se deben emplear en la técnica de combinación MRC [Djahani00], es decir:

$$\frac{\partial SNR}{\partial w_j} = \frac{2 R P_{r,j} \left(\sum_{j=1}^J w_j R P_{r,j} \right)}{\sum_{j=1}^J (w_j^2 \sigma_{total,j}^2)} - \frac{2 w_j \sigma_{total,j}^2 \left(\sum_{j=1}^J w_j R P_{r,j} \right)^2}{\left(\sum_{j=1}^J (w_j^2 \sigma_{total,j}^2) \right)^2} = 0 \quad (2.32)$$

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: <http://sede.ull.es/validacion>

Identificador del documento: 866822 Código de verificación: fbsse0hw

Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

$$w_j = \frac{\sum_{j=1}^J (w_j^2 \sigma_{total,j}^2)}{\sum_{j=1}^J (w_j R P_{r,j})} \cdot \frac{R P_{r,j}}{\sigma_{total,j}^2} = k_0 \cdot \frac{R P_{r,j}}{\sigma_{total,j}^2} \quad (2.33)$$

Como el factor k_0 de la expresión (2.33) es el mismo para todo los elementos de detección, es posible afirmar que, para MRC, el valor de cada uno de los pesos w_j es proporcional a la relación entre la intensidad de corriente de señal y la varianza total de ruido recibida por cada elemento receptor, tal y como se había anticipado.

Sustituyendo ahora el valor de los pesos obtenido de la ecuación (2.33) en la expresión (2.31), se obtiene que la SNR total correspondiente a la combinación MRC coincide con la suma de las SNR individuales de cada elemento detector, es decir:

$$SNR_{MRC} = \frac{\left(\sum_{j=1}^J \left(k_0 \cdot \frac{R P_{r,j}}{\sigma_{total,j}^2} \right) \cdot R P_{r,j} \right)^2}{\sum_{j=1}^J \left(k_0 \cdot \frac{R P_{r,j}}{\sigma_{total,j}^2} \right)^2 \cdot \sigma_{total,j}^2} = \sum_{j=1}^J \frac{(R P_{r,j})^2}{\sigma_{total,j}^2} = \sum_{j=1}^J SNR_j \quad (2.34)$$

En la técnica de combinación SB (*Selection Best*) se escoge como señal combinada la señal recibida por el elemento detector j -ésimo con la mejor SNR. Esta técnica permite separar la señal deseada del ruido debido a la luz ambiental, pero con ganancias menores que las que se pueden obtener a través de MRC. Por ejemplo, en enlaces difusos se demuestra que para alcanzar la misma SNR, la utilización de la técnica SB implica una penalización de potencia óptica transmitida de 1 a 2 dB frente a MRC [Valadas94]. Asimismo, se indica que si se utilizan elementos detectores con un FOV menor de 50° se consigue una reducción significativa de la dispersión del retardo por multipropagación [Lomba95], lo que la hace adecuada para aplicaciones donde se requiere una alta velocidad de transmisión. Sin embargo, al igual que en la técnica MRC, la implementación de SB también requiere de la estimación de la SNR de cada uno de los elementos detectores. La SNR que se obtiene mediante la aplicación de la técnica SB viene dada por la expresión [Al-Ghamdi04b]:

$$SNR_{SB} = \max_j \left(\frac{(R P_{r,j})^2}{\sigma_{total,j}^2} \right), \quad 1 \leq j \leq J \quad (2.35)$$

Por último, la técnica EGC (*Equal-Gain Combining*), es similar a MRC pero considerando que todos los pesos w_j son iguales a una constante w , es decir,

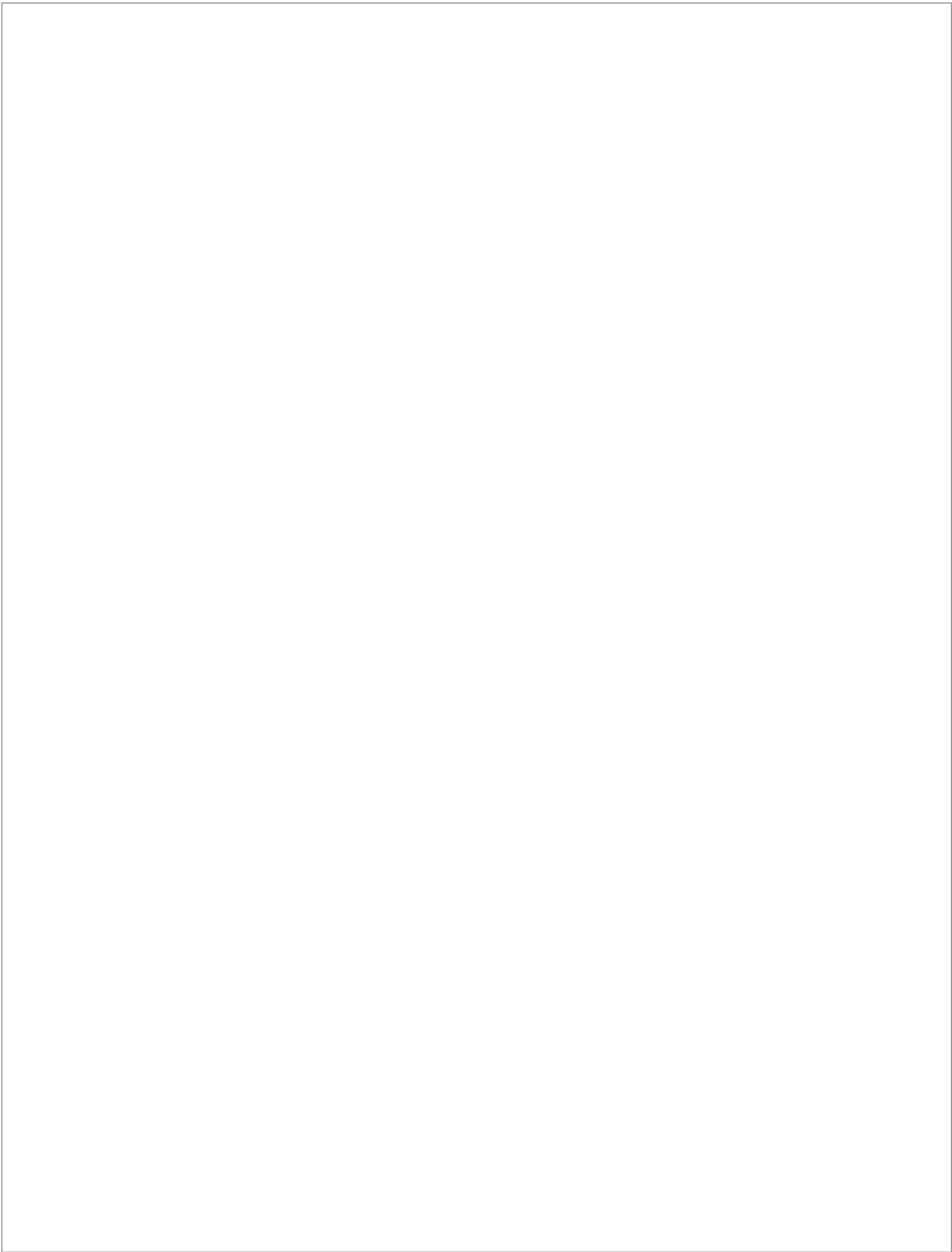
Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

$w_j = w$, para todo elemento j . Esta técnica permite aumentar el FOV total del receptor, pero es incapaz de separar la señal deseada del ruido y de las interferencias. De hecho, el uso de esta técnica puede aumentar la distorsión por multipropagación, por lo que no es apropiada para enlaces de alta velocidad. Sin embargo, es atractiva por su simplicidad, al no requerir de la estimación de la SNR de cada elemento receptor, como ocurría en los métodos anteriores. De hecho, con el método EGC se ha conseguido un funcionamiento robusto en sistemas difusos operando a velocidades inferiores a 4 Mb/s [Gfeller96]. En este caso, la SNR que caracteriza a la técnica EGC se puede expresar como [Al-Ghamdi04]:

$$SNR_{EGC} = \frac{\left(\sum_{j=1}^J w R P_{r,j} \right)^2}{\sum_{j=1}^J w^2 \sigma_{total,j}^2} = \frac{\left(\sum_{j=1}^J R P_{r,j} \right)^2}{\sum_{j=1}^J \sigma_{total,j}^2} \quad (2.36)$$

Como se puede observar, la SNR que se obtiene es independiente del valor constante w , elegido como factor multiplicativo de las señales de salida de cada elemento detector.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21



Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: <http://sede.ull.es/validacion>

	Identificador del documento: 866822	Código de verificación: fbsse0hw	Fecha:
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA			08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ			08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ			08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO			14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO			14/03/2017 21:06:21

Capítulo 3

Simulación del canal óptico no guiado en interiores

El canal óptico con IM/DD se puede modelar como un sistema lineal en banda base. Al tratarse de un sistema lineal, éste queda perfectamente caracterizado por su respuesta al impulso, la cual es fija para una configuración física del emisor, receptor y superficies reflectoras que conforman el ambiente de interior donde se establece la comunicación. En general, si se considera que las variaciones de la respuesta al impulso, debidas a desplazamientos del emisor o del receptor, o por alteraciones de las superficies reflectoras debidas a desplazamientos de las personas u objetos que se encuentran en el interior de la habitación, son muy lentas en comparación a la velocidad de transmisión de datos, el canal se puede considerar estacionario e invariante en el tiempo [Hashemi93a, Hashemi93b]. Como se indicó en el capítulo 1, uno de los campos en los que se centran los estudios en el campo de las comunicaciones ópticas inalámbricas en interiores se refiere a la caracterización del canal óptico tanto a través de la realización de medidas experimentales como mediante simulación. En general, se han desarrollado diferentes herramientas de simulación cuyos algoritmos se pueden clasificar atendiendo al método de resolución que utilizan en algoritmos basados en métodos analíticos, iterativos y estadísticos.

La propuesta de F. R. Gfeller constituye la primera aportación sobre la caracterización de canales IR en interiores mediante simulación [Gfeller79]. En él se propone resolver el problema de la propagación de la radiación IR en una habitación de manera analítica, lo cual es factible para configuraciones muy sencillas y si el estudio se restringe a una o dos reflexiones. Otra propuesta basada en un modelo analítico es la realizada por V. Jungnickel [Jungnickel02], la cual ha sido también referenciada posteriormente en diferentes investigaciones sobre sistemas VLC [Grubor05, Grubor08]. En ella se estima la respuesta en frecuencia del canal, la cual se construye mediante la combinación de las contribuciones debidas a la componente difusa (no-LOS) y directa (LOS). La contribución debida a la componente difusa se determina a partir de un modelo esférico basado en el concepto de esfera integradora de Ulbricht, y la componente LOS se utiliza para determinar el nivel de influencia de dicha componente difusa en la respuesta del canal. Entre las herramientas basadas en métodos iterativos caben destacar las propuestas por J. R. Barry [Barry93, Lee11], R. Pérez-Jiménez [Pérez-Jiménez95] y F. J. López-Hernández [López-Hernández97]. En cuanto a las herramientas basadas en la utilización de métodos estadísticos, se encuentran

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

las propuestas por R. Pérez-Jiménez [Pérez-Jiménez97] y F. J. López-Hernández [López-Hernández98a]. Ésta última, fundamentada en el uso de técnicas de trazado de rayos y en el método de Monte Carlo, destaca frente a las restantes por presentar una menor complejidad computacional. Sin embargo, a continuación se planteó una modificación de dicho algoritmo, conocida como Monte Carlo Modificado o MMC (*Modified Monte Carlo*), que mejoraba aún más su capacidad computacional, principalmente en situaciones donde se deseaba caracterizar el canal con una mayor precisión o confiabilidad [López-Hernández98b, López-Hernández00]. Al tratarse de un algoritmo basado en el método estadístico de Monte Carlo, aporta una solución de tipo aproximada, con una exactitud que depende en gran medida del número de rayos utilizados, tal y como se demuestra en los trabajos de O. González [González02a, González02b, González05a, González05b], en los cuales además, se aporta una expresión analítica que permite determinar el grado de confianza de las soluciones obtenidas. Con posterioridad a su publicación, se han producido diferentes aportaciones sobre el algoritmo MMC con la idea de posibilitar la inclusión del efecto de otra clase de reflexiones distintas a las de tipo difuso, incorporar el uso de lentes y concentradores, así como modelar algunas estructuras de transmisión y recepción con diversidad angular [Rodríguez02, Rodríguez03a, Rodríguez03b, Rodríguez03c, Rufo15]. Entre las aportaciones realizadas sobre el algoritmo MMC cabe destacar el algoritmo PTA (*Photon-Tracing Algorithm*) desarrollado por S. Zhang, que consigue mejorar la eficiencia computacional del MMC a costa de obtener una caracterización del canal con menor exactitud [Zhang10]. Por último, se encuentra el algoritmo formulado por M. Chowdhury [Chowdhury14], el cual combina el algoritmo iterativo de J. R. Barry y el MMC de F. J. López-Hernández. El primero lo emplea para resolver el problema del cálculo de la contribución directa o LOS, y el segundo, para determinar la contribución debida a la señal que sufre al menos una reflexión. Su utilidad es muy limitada, pues sólo mejora computacionalmente al MMC bajo circunstancias muy particulares. De todos los modelos y algoritmos de simulación comentados, los dos que han tenido mayor repercusión han sido el iterativo propuesto por J. R. Barry y el MMC de F. J. López-Hernández.

En este capítulo se describe el modelo de propagación básico y el algoritmo de simulación MMC que conjuntamente posibilitan estimar la respuesta al impulso del canal óptico inalámbrico en ambientes de interior, suponiendo una transmisión óptica de tipo monocromática, tal y como se suele considerar en los enlaces operando en el infrarrojo. Además de presentar un modelo matemático que permite aproximar el efecto del ruido derivado de las fuentes de luz ambiental, también se acomete la adaptación del algoritmo de simulación para poder estudiar aquellos enlaces donde la transmisión óptica abarca un amplio rango espectral, tal y como acontece en los sistemas VLC.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

3.1. Modelo de propagación.

El modelo de propagación hace referencia a los modelos matemáticos necesarios para caracterizar el efecto de cada uno de los elementos que constituyen el enlace: emisores ópticos, superficies reflectoras y receptores ópticos. En la Figura 3.1 se representa gráficamente un ejemplo del modelo de propagación básico que se va a utilizar para describir el algoritmo de simulación. A continuación se describen los modelos matemáticos utilizados para definir cada uno de los elementos que lo conforman.

3.1.1. Modelo del emisor óptico.

De manera general, una fuente óptica o emisor (Figura 3.1), según el modelo propuesto por F. R. Gfeller [Gfeller79] y J. R. Barry [Barry93, Barry94], queda caracterizada por su posición dentro del recinto \mathbf{p}_E , su orientación \mathbf{n}_E , potencia emitida P_E , y por un diagrama de radiación modelado según un perfil Lambertiano generalizado con simetría axial e independiente de γ , dado por:

$$R_E(\phi, n) = \frac{n+1}{2\pi} P_E \cos^n(\phi), \quad -\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2, \quad 0 \leq \gamma \leq 2\pi \quad (3.1)$$

donde n es el índice modal que define el grado de direccionalidad del lóbulo de radiación, el cual está relacionado con el valor del ángulo de potencia mitad $\phi_{1/2}$ por:

$$n = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \phi_{1/2})} \quad (3.2)$$

3.1.2. Modelo del receptor óptico.

De manera similar al emisor, el receptor óptico (Figura 3.1), queda caracterizado por su posición \mathbf{p}_R , orientación \mathbf{n}_R , su área física activa A_R y por su ángulo o campo de visión (FOV, *Field Of View*). El FOV define el máximo ángulo de incidencia respecto a \mathbf{n}_R , en el que la señal recibida puede ser detectada.

Un receptor detecta una potencia óptica proporcional a su área de colección efectiva de luz. Ignorando las pérdidas por reflexión, un detector alcanza un área efectiva de:

$$A_{ef}(\psi) = A_R \cos(\psi) \text{rect} \left[\frac{\psi}{FOV} \right] \quad (3.3)$$

$$\text{rect} \left[\frac{\psi}{FOV} \right] = \begin{cases} 1 & [x] \leq 1 \\ 0 & [x] > 1 \end{cases}$$

donde ψ es el ángulo de incidencia con respecto al eje del receptor \mathbf{n}_R .

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

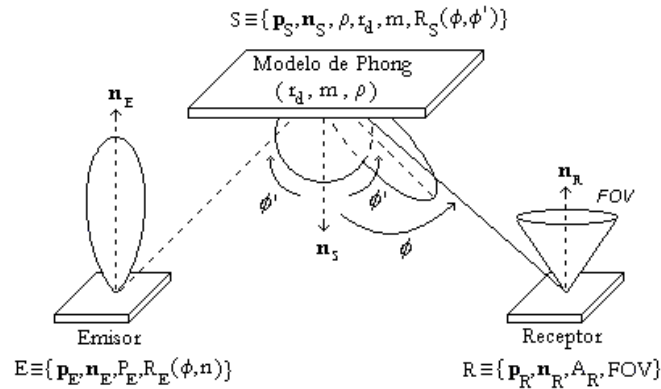


Figura 3.1. Representación gráfica del modelo de propagación básico.

3.1.3. Modelo del reflector.

El reflector es un elemento que puede estar o no presente en el enlace óptico. El reflector, en general, se puede caracterizar por su vector de posición \mathbf{p}_s , su vector de orientación \mathbf{n}_s , su diagrama de radiación $R_S(\phi, \phi')$ y por su coeficiente de reflexión ρ , el cual determina la fracción de potencia óptica incidente que es reflejada.

En este trabajo, para aproximar el patrón de reflexión de las superficies reflectoras que conforma el ambiente de interior, se ha utilizado el modelo de reflexión de Phong [Lomba98, Rodríguez02]. Este modelo aproxima el patrón de reflexión de la superficie mediante la suma de dos componentes: una difusa y otra especular (ver Figura 3.1). La expresión analítica que describe el modelo viene dada por:

$$R_S(\phi, \phi') = \rho P_{inc} \left(\frac{r_d}{\pi} \cos \phi + (1 - r_d) \frac{m+1}{2\pi} \cos^m(\phi - \phi') \right) \quad (3.4)$$

donde $r_d \in [0,1]$ es el porcentaje de la señal que se refleja de manera difusa, m representa la directividad de la componente especular, ϕ' es la dirección especular de reflexión y ϕ se corresponde con el ángulo de observación. Además, si P_{inc} es la potencia incidente sobre el reflector, el producto $\rho \cdot P_{inc}$ representará la potencia reflejada por el reflector.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

3.2. Descripción del algoritmo MMC.

El algoritmo, basado en el método estadístico de Monte Carlo, emplea técnicas de trazado de rayos para obtener una estimación de la respuesta al impulso del canal formado por el emisor, el receptor y las superficies que conforma el entorno de simulación.

En general, para una posición arbitraria del emisor E y del receptor R , la respuesta al impulso total se puede expresar como la suma de la respuesta al impulso por visión directa entre el emisor y el receptor $h^{(0)}(t;E,R)$, la cual se determina analíticamente, y la respuesta al impulso debida a la señal que alcanza al receptor después de sufrir una o varias reflexiones $h^{(k)}(t;E,R)$. Así, la respuesta al impulso del canal se puede expresar como una suma infinita de la forma:

$$h(t;E,R) = h^{(0)}(t;E,R) + \sum_{k=1}^{\infty} h^{(k)}(t;E,R) \quad (3.5)$$

donde k es el número de reflexiones que sufre la señal antes de alcanzar al receptor.

3.2.1. Respuesta al impulso por visión directa.

Si se consideran distancias entre el emisor y el receptor muy superiores a las dimensiones de la superficie del receptor, en un entorno carente de superficies reflectoras (Figura 3.2), la respuesta al impulso por visión directa entre el emisor y el receptor, configuración LOS (*Line-Of-Sight*), viene dada por [Barry93]:

$$h^{(0)}(t;E,R) = \frac{1}{(d_{0,R})^2} R_E(\phi,n) A_{ef}(\psi) \delta\left(t - \frac{d_{0,R}}{c}\right) \quad (3.6)$$

donde c es la velocidad de la luz, ϕ es el ángulo de emisión con respecto a la orientación del emisor \mathbf{n}_E , ψ es el ángulo de recepción de la radiación definido con respecto a la orientación del receptor \mathbf{n}_R , $d_{0,R}$ es la distancia entre el emisor y el receptor, $A_{ef}(\psi)$ es el área efectiva de detección y $R_E(\phi,n)$ representa el patrón de radiación del emisor.

3.2.2. Respuesta al impulso debida a múltiples reflexiones.

El cálculo de la respuesta al impulso, en el caso de que la señal transmitida llegue al receptor sufriendo al menos una reflexión (Figura 3.3), se realiza haciendo uso de la técnica de trazado de rayos y del método de Monte Carlo. Para ello, se genera un número N elevado de rayos que parten desde la posición del emisor \mathbf{p}_E , con una potencia inicial de P_E/N , y con una orientación \mathbf{n}_{ray} , asignada aleatoriamente según una función de distribución de probabilidad obtenida a partir del diagrama de radiación de dicho emisor. A continuación, cada

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

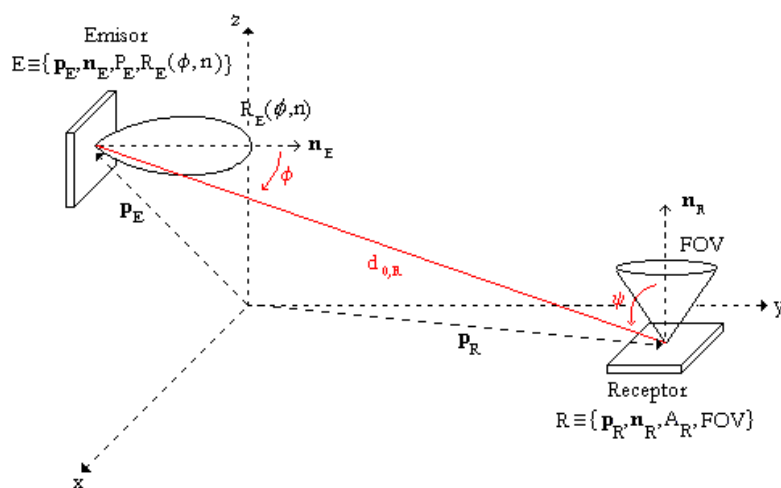


Figura 3.2. Configuración de emisor y receptor en un entorno sin superficies reflectoras.

rayo se propaga hasta que colisione con alguna de las superficies. El punto donde se ha producido la colisión se considera como una nueva fuente óptica, generándose un nuevo rayo a partir de dicha posición \mathbf{p}_i , con una orientación también aleatoria, generada en este caso según el patrón de reflexión de la superficie donde se ha producido la reflexión. Cada uno de los rayos se propaga hasta que el tiempo de propagación supere el tiempo máximo de simulación establecido (t_{max}). Como el fin es obtener información de la distribución temporal de la potencia que llega al receptor, a cada uno de los rayos se le asocia durante todo el proceso de simulación dos parámetros: el tiempo de propagación, interpretado como el tiempo que ha transcurrido desde que el rayo partió desde el emisor, y la potencia que transporta.

Después de cada reflexión, la potencia asociada a cada rayo se reduce según el coeficiente de reflexión de la superficie donde se ha producido la reflexión y se determina la potencia reflejada que detecta el receptor mediante la aproximación de visión directa entre el reflector, como si fuera un nuevo emisor con un diagrama de radiación igual al modelo de reflexión, y el receptor. De este modo, la contribución de potencia incidente en el receptor debida al rayo i -ésimo generado desde el emisor ($1 \leq i \leq N$) después de haber sufrido k reflexiones, viene dada por [Rodríguez02]:

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Identificador del documento: 866822	Código de verificación: fbsse0hw	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

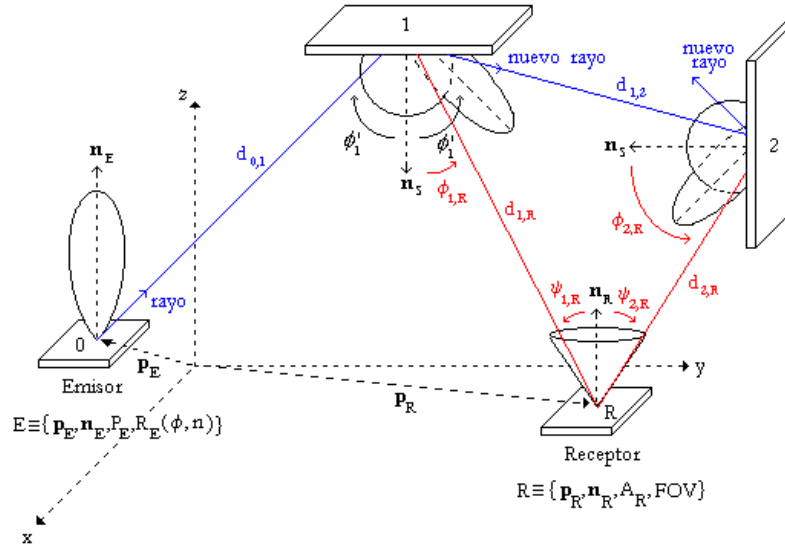


Figura 3.3. Configuración de emisor y receptor en un entorno con superficies reflectoras.

$$P_{i,k}(E, R) = \frac{1}{(d_{k,R})^2} R_S(\phi_{k,R}, \phi') A_{ef}(\psi_{k,R})$$

$$t_{i,k} = \left(\sum_{j=1}^k \frac{d_{j-1,j}}{c} \right) + \frac{d_{k,R}}{c} \quad (3.7)$$

donde c es la velocidad de la luz y $t_{i,k}$ representa el instante de tiempo en el que se produce la contribución de potencia en el receptor, calculado a partir de las distancias $d_{j-1,j}$ recorridas por el rayo desde que sale del emisor tras cada reflexión y de la distancia $d_{k,R}$ desde el receptor hasta el punto de colisión correspondiente a la k -ésima reflexión. En la ecuación, $R_S(\phi_{k,R}, \phi')$ representa el modelo de Phong utilizado para aproximar el patrón de reflexión de la superficie donde se ha producido la k -ésima reflexión, el cual se describió a través de la ecuación (3.4). En este caso, en el modelo, el valor de P_{mc} representa la potencia del rayo antes de sufrir la k -ésima reflexión, es decir:

$$P_{mc} = \frac{P_E}{N} \prod_{j=1}^{k-1} \rho_j \quad (3.8)$$

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.uill.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

donde P_E es la potencia total emitida por el emisor, N es el número total de rayos generados desde el emisor, y el producto de los ρ_j representa las pérdidas debidas a las $k-1$ reflexiones sufridas por el rayo antes de sufrir la k -ésima reflexión.

A partir de la ecuación (3.7), si se suman todas las contribuciones de potencia $P_{i,k}$ debida a todos los N rayos y sus K reflexiones, y se utiliza la función delta de Dirac para expresar matemáticamente los instantes de tiempo $t_{i,k}$ de (3.7) en los que cada contribución es detectada por el receptor, se obtiene la distribución temporal de potencia detectada por el receptor, es decir, la respuesta al impulso debida a múltiples reflexiones, cuya expresión viene determinada por:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{\infty} h^{(k)}(t; E, R) &= \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K P_{i,k}(E, R) \cdot \delta(t - t_{i,k}) = \\ &= \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \frac{1}{(d_{k,R})^2} R_S(\phi_{k,R}, \phi') A_{ef}(\psi_{k,R}) \cdot \delta\left(t - \left(\sum_{j=1}^k \frac{d_{j-1,j}}{c}\right) - \frac{d_{k,R}}{c}\right) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.6) y (3.9) en (3.5) se obtiene finalmente la expresión de la respuesta al impulso del canal para una determinada configuración de emisor, receptor y superficies reflectoras que definen el entorno de simulación:

$$\begin{aligned} h(t; E, R) &= \frac{1}{(d_{0,R})^2} R_E(\phi, n) A_{ef}(\psi) \delta\left(t - \frac{d_{0,R}}{c}\right) + \\ &+ \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \frac{1}{(d_{k,R})^2} R_S(\phi_{k,R}, \phi', \lambda) A_{ef}(\psi_{k,R}) \cdot \delta\left(t - \left(\sum_{j=1}^k \frac{d_{j-1,j}}{c}\right) - \frac{d_{k,R}}{c}\right) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Si se divide el tiempo máximo de simulación en M pequeños intervalos de tiempo Δt , de tal modo que $M = t_{max}/\Delta t$, y consideramos que el instante inicial es el instante de tiempo en el que llega la componente de la contribución por línea de visión directa, la respuesta al impulso se puede expresar como un histograma de intervalos Δt , de la forma:

$$\begin{aligned} h(t; E, R) &= \frac{1}{(d_{0,R})^2} R_E(\phi, n) A_{ef}(\psi) \delta(t) + \\ &+ \sum_{n=1}^{M-1} \sum_{i=1}^{N_n} \sum_{k=1}^{K_n} \frac{1}{(d_{k,R})^2} R_S(\phi_{k,R}, \phi') A_{ef}(\psi_{k,R}) \cdot \delta(t - n \Delta t) \end{aligned} \quad (3.11)$$

donde n simboliza el intervalo de tiempo n -ésimo de ancho Δt , es decir, cada uno de los intervalos del histograma de la repuesta al impulso. K_n y N_n representan el número de reflexiones sufridas por el rayo i -ésimo y el número de rayos que contribuyen en el receptor durante el intervalo de tiempo n -ésimo, respectivamente.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

La ecuación anterior también puede expresarse de la forma:

$$h(t; E, R) = \frac{1}{(d_{0,R})^2} R_E(\phi, n) A_{ef}(\psi) \delta(t) + \sum_{n=1}^{M-1} P_n(E, R) \cdot \delta(t - n \Delta t) \quad (3.12)$$

donde P_n representa la potencia total detectada por el receptor en el intervalo de tiempo n -ésimo. El cálculo de P_n se obtiene sumando todas las potencias debidas a los N_n rayos que contribuyen en ese intervalo de tiempo, de la forma:

$$P_n(E, R) = \sum_{i=1}^{N_n} P_{i,n}(E, R) = \sum_{i=1}^{N_n} \sum_{k=1}^{K_n} \frac{1}{(d_{k,R})^2} R_S(\phi_{k,R}, \phi') A_{ef}(\psi_{k,R}) \quad (3.13)$$

donde $P_{i,n}$ es la potencia total que incide en el receptor en el intervalo de tiempo n -ésimo debida a la propagación del rayo i -ésimo ($i = 1, 2, 3, \dots, N_n$).

Como se deriva de la descripción del cálculo de la respuesta al impulso haciendo uso del algoritmo MMC, el procedimiento en el que se basa comprende los siguientes procesos básicos: generación de cada rayo desde el emisor, propagación del rayo y obtención de la respuesta al impulso a través del cálculo de la potencia que llega al receptor tras cada reflexión.

3.2.3. Generación de los rayos desde el emisor.

Uno de los procesos básicos del algoritmo consiste en generar un número elevado de rayos, N , con una orientación, \mathbf{n}_{rayo} , asignada de manera aleatoria según el diagrama de radiación del emisor $R_E(\phi, n)$.

Los vectores unitarios \mathbf{n}'_{rayo} , ver Figura 3.4(a), expresados en coordenadas cartesianas (x', y', z') , que definen las orientaciones aleatorias de los rayos según un diagrama de radiación Lambertiano, se obtienen a través de las siguientes expresiones matemáticas:

$$\begin{aligned} z' &= \cos \phi = \sqrt[2]{U} \\ x' &= r \cos \gamma = r \cos(2\pi V) \quad r = \sqrt{1 - z'^2} \\ y' &= r \operatorname{sen} \gamma = r \operatorname{sen}(2\pi V) \end{aligned} \quad (3.14)$$

donde U y V son variables aleatorias distribuidas uniformemente entre 0 y 1. En las expresiones se ha considerado que la componente z' coincide con la dirección de orientación del emisor \mathbf{n}_E , y que x' e y' están contenidas en el plano que define la superficie de emisión (Figura 3.4(b)).

Como lo que se desea obtener es el vector de orientación del rayo \mathbf{n}_{rayo} , en función del sistema de referencia del recinto o habitación (x, y, z) , donde se establece el enlace, es necesario realizar un proceso de rotación según los ángulos θ y φ (Figura 3.4(c)). El ángulo θ es el formado por los ejes z' y z , y el ángulo φ , el

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

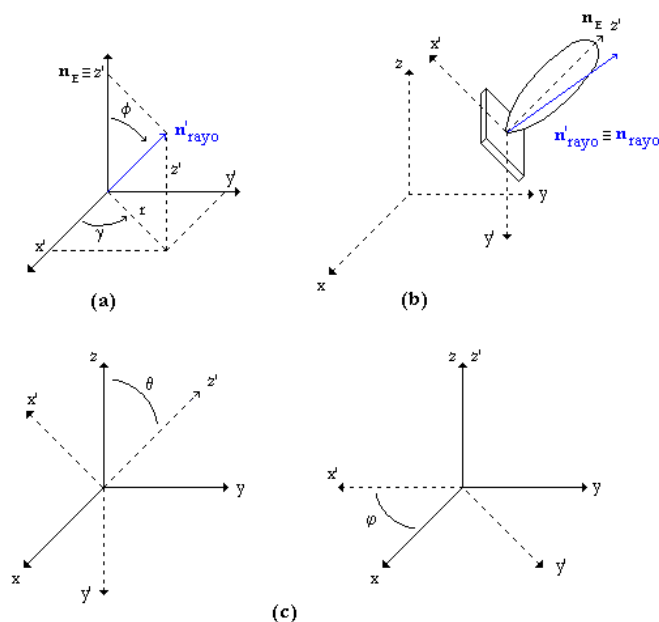


Figura 3.4. (a) Relación de la variable ϕ con las coordenadas cilíndricas y cartesianas. (b) Sistemas de referencia del emisor y de la habitación. (c) Definición de los ángulos de rotación θ y ϕ .

formado por los ejes x' y x . La matriz M que permite obtener las coordenadas de \mathbf{n}_{rayo} a partir de $\mathbf{n}'_{\text{rayo}}$ se define como:

$$M = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \theta & -\text{sen} \phi & \cos \phi \text{sen} \theta \\ \text{sen} \phi \cos \theta & \cos \phi & \text{sen} \phi \text{sen} \theta \\ -\text{sen} \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

De esta manera, una vez generado el vector unitario $\mathbf{n}'_{\text{rayo}}$, a través de (3.14), y antes de propagar el rayo, es necesario obtener la orientación del rayo \mathbf{n}_{rayo} respecto a las coordenadas generales mediante la operación:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \theta & -\text{sen} \phi & \cos \phi \text{sen} \theta \\ \text{sen} \phi \cos \theta & \cos \phi & \text{sen} \phi \text{sen} \theta \\ -\text{sen} \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003
 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: <http://sede.ull.es/validacion>

Identificador del documento: 866822

Código de verificación: fbsse0hw

Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

3.2.4. Propagación del rayo.

La ecuación que determina en cada instante de tiempo la posición del rayo es:

$$\mathbf{p}_{\text{rayo}}(\lambda) = \mathbf{p}_{0,\text{rayo}} + \lambda \mathbf{n}_{\text{rayo}} \quad \lambda \geq 0 \quad (3.17)$$

donde $\mathbf{p}_{0,\text{rayo}}$ es la posición inicial desde la que partió el rayo, \mathbf{n}_{rayo} es el vector unitario que indica su orientación y λ es un escalar mayor o igual a cero que permite determinar la posición del rayo en cualquier instante de tiempo.

Una vez generado cada rayo desde la posición del emisor, $\mathbf{p}_{0,\text{rayo}} = \mathbf{p}_E$, se determina el punto de corte con alguna de las superficies de la habitación. Para determinar dicho punto, se resuelve el sistema de ecuaciones formado por la ecuación que define la propagación del rayo y cada una de las ecuaciones que definen cada una de las N_s superficies:

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{\text{rayo}}(\lambda) &= \mathbf{p}_E + \lambda \mathbf{n}_{\text{rayo}} & \lambda &\geq 0 \\ f_i(x, y, z) &= 0 & i &= 1, \dots, N_s \end{aligned} \quad (3.18)$$

El punto de colisión del rayo con la superficie será la nueva posición de salida de éste. La orientación de salida, $\mathbf{n}'_{\text{rayo}}$, se determinará de manera aleatoria, con el método descrito anteriormente para la generación de rayos desde la posición del emisor, pero considerando en este caso el patrón de reflexión de la superficie.

Como se ha indicado anteriormente, en este trabajo, el modelo de reflexión utilizado para aproximar el patrón de reflexión de las superficies reflectoras es el de Phong, el cual permite aproximar el comportamiento de reflectores tanto difusos como especulares mediante la ecuación (3.4). Por lo tanto, para generar un nuevo rayo con una orientación aleatoria según el modelo de Phong, se procede de la siguiente manera. Inicialmente se genera una variable aleatoria uniformemente distribuida entre 0 y 1, si dicho valor es menor que r_b se considera que la reflexión es puramente difusa, y en caso contrario, es decir, mayor que r_b , totalmente especular. Las ecuaciones mostradas en (3.19) permiten obtener el vector unitario $\mathbf{n}'_{\text{rayo}}$, que define la orientación del nuevo rayo generado en coordenadas cartesianas (x', y', z') .

$$\begin{aligned} \text{Difusa: } & \begin{cases} z' = \cos \phi = \sqrt{U} \\ x' = r \cos \gamma = r \cos(2\pi V) \\ y' = r \text{ sen } \gamma = r \text{ sen}(2\pi V) \end{cases} & r = \sqrt{1 - z'^2} \\ \text{Especular: } & \begin{cases} z' = \cos(\phi - \phi') = m + \sqrt{U} \\ x' = r \cos \gamma = r \cos(2\pi V) \\ y' = r \text{ sen } \gamma = r \text{ sen}(2\pi V) \end{cases} & r = \sqrt{1 - z'^2} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

Como se puede observar, en el caso de considerar reflexión difusa, $\mathbf{n}'_{\text{rayo}}$ se obtiene a partir de la ecuación (3.14) particularizada para $n = 1$, donde ahora la componente \tilde{x}' coincide con el vector normal a la superficie donde se ha producido la reflexión \mathbf{n}_s , y las componentes x' e y' están contenidas en el plano que define dicha superficie. En el caso de considerar reflexión especular, $\mathbf{n}'_{\text{rayo}}$ se obtiene particularizando la ecuación (3.14) con $n = m+1$. En esta situación, \tilde{x}' coincide con la dirección de la componente especular y x' e y' están contenidas en el plano de una hipotética superficie con un vector normal cuya orientación coincide con la de dicha componente especular. En ambos casos, como lo que se desea es obtener el vector que define la orientación del nuevo rayo \mathbf{n}_{rayo} respecto al sistema de referencia de la habitación (x, y, \tilde{z}) , es necesario realizar una rotación según el ángulo θ , formado por los ejes \tilde{x}' y \tilde{z} , y el ángulo φ , formado por los ejes x' y x . La matriz de rotación M que permite obtener \mathbf{n}_{rayo} a partir de $\mathbf{n}'_{\text{rayo}}$ es la misma que la mostrada en la ecuación (3.15). De esta manera, la ecuación que define la posición del rayo después de que se haya producido una reflexión es:

$$\mathbf{p}_{\text{rayo}}(\lambda) = \mathbf{p}_s + \lambda \mathbf{n}_{\text{rayo}} \quad \lambda \geq 0 \quad (3.20)$$

donde \mathbf{p}_s es el vector de posición que indica donde se ha producido la reflexión, y \mathbf{n}_{rayo} es el vector de orientación que indica la nueva dirección de propagación del rayo respecto al sistema de referencia de la habitación.

El rayo se propaga hasta que el tiempo de vuelo, tiempo transcurrido desde que el rayo partió desde el emisor, supere el tiempo máximo de simulación establecido, t_{max} .

3.2.5. Evaluación del error debido al método de Monte Carlo.

El método de Monte Carlo presenta dos peculiaridades. La primera de ellas consiste en que su algoritmo tiene una estructura muy sencilla, y la segunda está relacionada con el hecho de que el método aporta una solución de tipo aproximada. Como regla, el error cometido es proporcional a la magnitud $(D/N)^{1/2}$, donde D es una constante y N es el número de pruebas realizadas para obtener la solución [López88, Rodríguez03b]. Esto pone de manifiesto la imposibilidad del método para alcanzar una solución con una elevada exactitud. Sin embargo, un mismo problema puede resolverse aplicando distintas variantes del método a las cuáles le corresponde diferentes valores de D , logrando, en muchos casos, elevar considerablemente la exactitud si se escoge un procedimiento de cálculo al que le corresponde un valor mucho menor de D .

En lo que se refiere a la técnica de trazado de rayos, ésta se ha venido utilizando desde la década de los sesenta dentro del marco de la acústica geométrica para obtener la respuesta al impulso de salas acústicas y auditorios. Entre ellos, caben destacar las publicaciones realizadas por J. Giner [Giner99, Giner01], en las que se aporta una expresión que permite calcular el error

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

cometido por un algoritmo, basado en el uso de técnicas de trazado de rayos y en el método de Monte Carlo, desarrollado para evaluar la energía acústica que alcanza al receptor durante un determinado intervalo de tiempo. Basados en estos trabajos, se han propuesto expresiones analíticas que permiten evaluar el error cometido en una simulación al obtener la respuesta al impulso en el canal IR en interiores debido a la utilización del algoritmo de trazado de rayos puro propuesto por F. J. López-Hernández [López-Hernández98a], para obtener la respuesta al impulso del canal IR en el interior de recintos con geometrías sencillas y en presencia de reflectores puramente difusos [González02a, González02b]. Posteriormente, la aplicación de dichas expresiones se extendió al algoritmo de trazado de rayos modificado, descrito en los apartados anteriores, el cual permite determinar la respuesta al impulso del canal IR en recintos con geometrías más complejas, con obstáculos y en presencia de superficies reflectoras caracterizadas por el modelo de Phong [Rodríguez03b, González05a, González05b, González11]. En estos trabajos, se presenta una expresión analítica que permite evaluar el error cometido a partir de una única simulación realizada para obtener la respuesta al impulso del canal IR en ambientes de interior. Por lo tanto, también se demuestra que no es necesario repetir el experimento un elevado número de veces y determinar los estadísticos de sus resultados para evaluar el error, tal y como establece el método de Monte Carlo. De esta forma, el tiempo de simulación que se invertiría en realizar ese gran número de simulaciones o experimentos, se puede aprovechar para realizar una única simulación con un número mayor de rayos y, por lo tanto, obtener así resultados más precisos.

La expresión analítica que permite determinar el error cometido al obtener la respuesta al impulso del canal IR no guiado en interiores, debido a la utilización del algoritmo MMC, se puede obtener a partir de la raíz cuadrada de la varianza de la potencia total detectada por el receptor en el intervalo de tiempo n -ésimo, de ancho igual a Δt (donde Δt representa cada uno de los intervalos del histograma o respuesta al impulso). De este modo, la expresión que define el error absoluto viene dada por:

$$\varepsilon(P_n) = \sqrt{\text{var}(P_n)} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_n} P_{i,n}^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^{N_n} P_{i,n} \right)^2} \quad (3.21)$$

donde N es el número total de rayos generados desde la posición del emisor, N_n se refiere al número de rayos que contribuyen en el intervalo de tiempo n -ésimo, P_n es la potencia total detectada por el receptor en dicho intervalo de tiempo, y $P_{i,n}$ es la potencia total que incide en el receptor en dicho intervalo debida a la propagación del rayo i -ésimo ($1 \leq i \leq N_n$). En la ecuación (3.13) se definen las expresiones que permiten determinar P_n y $P_{i,n}$.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

El error relativo en un intervalo de tiempo Δt se puede calcular como el cociente entre la raíz cuadrada de la varianza, que se ha definido como error absoluto, y la contribución de potencia P_n :

$$\varepsilon_r(P_n) = \frac{\sqrt{\text{var}(P_n)}}{P_n} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_n} P_{i,n}^2}}{\left(\sum_{i=1}^{N_n} P_{i,n}\right)^2} - \frac{1}{N} \quad (3.22)$$

Como máximo admisible de intervalo pequeño de tiempo Δt , se entiende aquel que asegura que un receptor localizado cerca de las paredes no es impactado dos veces por el mismo rayo.

Como se indicó con anterioridad, el método de Monte Carlo establece que el error cometido es proporcional a $1/\sqrt{N}$, es decir, una vez calculado el error habiendo utilizado N rayos, es posible evaluar dicho error para un número de rayos mayor. Por ejemplo, si el error relativo obtenido es del 4,5 % habiendo empleado 100.000 rayos, el número de rayos necesario para disminuir el error hasta el 2 % es de 500.000 ($2\% = 4,5\% \sqrt{100.000}/\sqrt{500.000}$).

La ecuación (3.22) se puede extender de manera directa para evaluar el error al considerar un gran intervalo de tiempo ΔT , sustituyendo N por el número total de vuelos N_f que se han producido durante dicho intervalo ΔT , en otras palabras, reemplazando N por las veces que cada uno de los rayos impacta con alguna de las superficies del recinto durante ΔT . El número de vuelos se puede expresar como:

$$N_f \cong \frac{\Delta T}{\delta t} N \quad (3.23)$$

donde δt es el valor medio del tiempo transcurrido entre sucesivos impactos de los rayos contra las superficies del recinto. El número de vuelos de un rayo N_f , es un parámetro que se puede calcular fácilmente en algoritmos de trazado de rayos, ya que la propagación de los rayos se controla continuamente durante la simulación.

Si se considera que ΔT es el tiempo transcurrido entre el instante inicial de simulación y cualquier otro instante posterior, la ecuación (3.22) nos permite determinar el error acumulado durante todo ese tiempo de simulación. Por lo tanto, el error relativo acumulado para un intervalo de tiempo ΔT viene descrito por:

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

$$\varepsilon_r(P_n) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_{AT}} P_{i,n}^2}}{\left(\sum_{i=1}^{N_{AT}} P_{i,n}\right)^2} - \frac{1}{N_f} \quad (3.24)$$

donde N_{AT} es el número de rayos que inciden en el receptor durante dicho intervalo de tiempo ΔT .

3.3. Modelo de ruido debido a la iluminación ambiental.

En esta sección se modela el ruido proveniente de las fuentes de iluminación artificiales y naturales que están presentes en el entorno de simulación. En concreto, debido a la luz procedente de las lámparas incandescentes y a la luz natural proveniente del sol. Tanto el efecto del ruido, debido a la luz artificial como la natural, depende en gran medida de la posición en la que se encuentren el emisor y el receptor dentro del ambiente de interior, así como de la localización de las fuentes de luz. Dicho de otra manera, que el ruido será mayor cerca de las lámparas o en zonas próximas a las ventanas y claraboyas. La captación de luz en estas zonas de iluminación constituye un serio problema para el funcionamiento de los receptores, y su influencia se debe considerar en el diseño de los mismos. Algunos resultados experimentales sobre distribución espacial de luz ambiental en entornos de oficina se pueden encontrar en [Tavares95, Tavares03].

3.3.1. Fuentes artificiales de luz: lámparas incandescentes.

Siguiendo los estudios de A. M. R. Tavares y de J. B. Carruthers [Tavares95, Tavares03, Carruthers00], si las lámparas incandescentes se encuentran suficientemente alejadas del receptor, su comportamiento se puede modelar como si fueran emisores puntuales con un perfil de radiación Lambertiano generalizado, con simetría axial e independiente de γ , como el que se presenta en la Figura 3.5(a), cuya expresión viene dada por:

$$R_L(\phi, n_L) = P_L \frac{n_L + 1}{2\pi} \cos^{n_L}(\phi) \quad 0 \leq \phi \leq \pi/2 \quad 0 \leq \gamma \leq 2\pi \quad (3.25)$$

Por tanto, una lámpara incandescente quedará completamente caracterizada, por las coordenadas de su posición y orientación (\mathbf{p}_L , \mathbf{n}_L), su potencia emitida en la banda de trabajo del receptor P_L , y por su diagrama de radiación $R_L(\phi, n_L)$. En este trabajo de tesis, se empleará el mismo modelo de lámpara que el empleado por J. B. Carruthers [Carruthers00], es decir, se supone que las lámparas de tungsteno son de 100 W y que radian en el margen comprendido entre 780 y

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

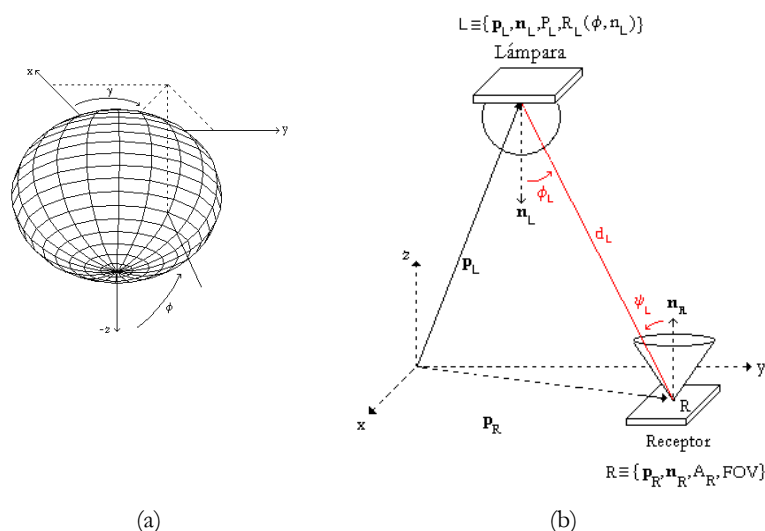


Figura 3.5. (a) Diagrama de radiación Lambertiano generalizado. (b) Geometría para el cálculo de la potencia de luz ambiental procedente de las lámparas incandescentes.

830 nm con una potencia de $P_L = 1,85$ W con un patrón de radiación Lambertiano de orden $n_L = 2$. Si se considera que la potencia está uniformemente distribuida en los 50 nm de ancho de banda espectral de emisión, se obtiene que la lámpara emite con una densidad espectral de potencia de 0,037 W/nm.

La principal diferencia del modelo propuesto en este trabajo, respecto a los estudios realizados con anterioridad, radica en la forma de computar la potencia óptica debida a las múltiples reflexiones que sufre la iluminación en las superficies del recinto antes de alcanzar al receptor. Si bien en los modelos anteriores se limita el cálculo a una única reflexión [Carruthers00] o se utiliza un modelo de decaimiento exponencial [Tavares03], en el modelo propuesto se tiene en cuenta toda la potencia debida al número de reflexiones que se deseen considerar.

3.3.2. Fuentes naturales de luz.

En el caso de la luz solar, el parámetro que se suele utilizar para caracterizar la potencia distribuida de la fuente de luz solar es la radiancia espectral. La radiancia espectral de una fuente, L_e , se define como la distribución espectral de potencia emitida por unidad de ángulo sólido y por unidad de área proyectada, que se suele expresar en $W/(cm^2 \cdot nm \cdot sr)$.

La radiación producida por la luz solar se puede considerar constante o varía lentamente con el tiempo, y dado que, por definición, una superficie con

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

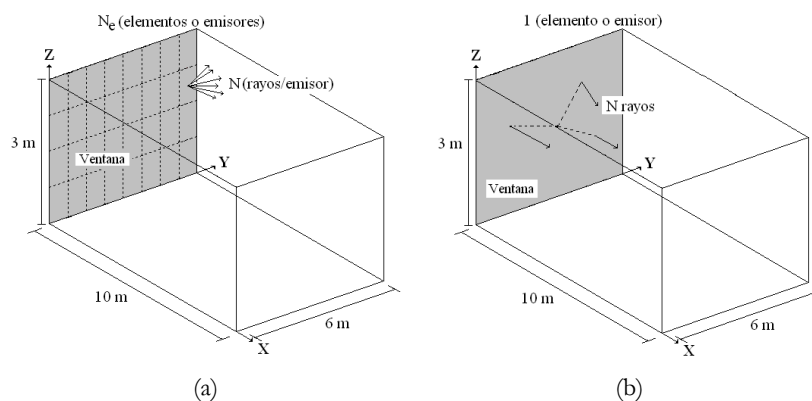


Figura 3.6. Ejemplo de un recinto típico de interior con una ventana en la pared $x=0$. (a) La ventana se divide en elementos de superficie que actúan como emisores. (b) La ventana se considera como un único emisor.

radiancia constante es, a su vez, una superficie emisora Lambertiana, se puede considerar que cada elemento diferencial de dicha superficie actúa como un emisor Lambertiano ($n = 1$), que emite con una potencia igual a $E_{nat} \cdot ds$, siendo E_{nat} la emitancia de la superficie [W/cm^2], y ds , el área de la superficie del elemento diferencial de la superficie emisora.

En anteriores trabajos, se propone como modelo para determinar el ruido debido a la iluminación natural procedente de ventanas y claraboyas [Kahn97, Tang96, Carruthers00, Djahani00, Jivkova00], la división de las fuentes de iluminación natural, o ventanas del recinto donde se establece el enlace, Figura 3.6(a), en un número de elementos N_e suficientemente elevado, que cumplan la condición de que la distancia entre cada elemento N_e y el receptor sea muy superior a las dimensiones de la superficie del receptor. Si se aplica este modelo sobre el algoritmo MMC, explicado con detalle en el apartado anterior, el cálculo de la potencia óptica de ruido debido a la luz natural recibida por el receptor, P_{nat} , consiste en determinar la potencia óptica total como la suma de las potencias detectadas por el receptor debidas a los N_e elementos emisores en los que se ha dividido la fuente de iluminación. Es decir, calcular la contribución por visión directa entre cada uno de los N_e elementos emisores y el receptor a través de la siguiente expresión:

$$P_{nat,j}^{LOS} = E_{nat} \cdot \Delta s \cdot \frac{1}{\pi} \cos(\phi_j) \frac{1}{(d_{j,R})^2} A_{ef}(\psi_j); \quad 1 \leq j \leq N_e \tag{3.26}$$

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

donde ϕ_j es el ángulo de emisión con respecto a la orientación del j -ésimo elemento de emisión $\mathbf{n}_{ventana}$, ψ_j es el ángulo de recepción de la radiación definido respecto a la orientación del receptor \mathbf{n}_R , d_j es la distancia entre el j -ésimo elemento emisor y el receptor, y $A_{ef}(\psi_j)$ es el área efectiva de detección. Además, se ha considerado que cada elemento de superficie de la ventana de área Δs presenta una emitancia definida por E_{nat} . Una vez determinada la contribución por visión directa, hay que determinar la debida a las múltiples reflexiones que sufre la señal procedente de cada elemento emisor antes de alcanzar al receptor, es decir, computar la contribución de potencia de cada uno de los N rayos generados desde cada uno de los N_e emisores, mediante la utilización de la siguiente ecuación:

$$P_{nat,j}^{no_LOS} = \sum_{i=1}^{N_j} \sum_{k=1}^{K_j} \frac{1}{(d_{k,R})^2} R_S(\phi_{k,R}, \phi') A_{ef}(\psi_{k,R}) \quad 1 \leq j \leq N_e \quad (3.27)$$

donde K_j y N_j representan el número de reflexiones sufridas por el rayo i -ésimo y el número de rayos que contribuyen en el receptor, respectivamente, y $R_S(\phi_{k,R}, \phi')$ es el patrón de radiación de la superficie del recinto con la que impacta el i -ésimo rayo tras sufrir la reflexión k -ésima.

Sumando las contribuciones de la potencia de luz recibida por iluminación directa y la procedente de las reflexiones, se obtiene la potencia de luz debida a cada elemento emisor, esto es:

$$P_{nat,j} = P_{nat,j}^{LOS} + P_{nat,j}^{no_LOS} \quad (3.28)$$

En definitiva, sumando todas las aportaciones de potencia proveniente de cada elemento emisor N_e , se obtiene el nivel de potencia total de luz natural, P_{nat} , detectada por el receptor:

$$P_{nat} = \sum_{j=1}^{N_e} P_{nat,j} \quad (3.29)$$

Para el modelo descrito, y considerando como una operación básica el cómputo de la ecuación (3.26) ó (3.27), el número total de operaciones a realizar, N^{op} , se puede obtener a partir de la suma del número de operaciones derivadas del cálculo de la contribución directa entre cada uno de los N_e emisores y el receptor, y las derivadas del cómputo de las contribuciones debidas a las múltiples reflexiones que sufren cada uno de los N rayos generados desde los N_e elementos emisores:

$$N^{op} = N_{LOS}^{op} + N_{no-LOS}^{op} = N_e + NN_e K \quad (3.30)$$

donde K es el número máximo de reflexiones consideradas en la simulación.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

En este trabajo de tesis se presenta un modelo alternativo para determinar la potencia de ruido debida a fuentes de iluminación natural extensas, como las ventanas, que se diferencia del anterior en la forma de obtener la contribución a la respuesta al impulso debida a las múltiples reflexiones que sufre la señal antes de alcanzar al receptor. Mientras que para calcular la contribución por visión directa se divide la fuente de iluminación o ventana en N_e elementos emisores, para computar la debida a las reflexiones, se propone considerar a la ventana como un único emisor. Es decir, el nuevo modelo consiste en generar los N rayos con una orientación aleatoria generada según su patrón de radiación, $R_{nat}(\phi, 1)$, y con una posición aleatoria distribuida uniformemente sobre la superficie que constituye la ventana. Un esquema representativo de este modelo se muestra en la Figura 3.6(b).

Para este nuevo modelo, se reduce en un factor N_e el número de operaciones derivadas del cómputo de las contribuciones debidas a las múltiples reflexiones que sufren cada uno de los N rayos generados desde la ventana, considerada como un único emisor, es decir $N_e = 1$. Por lo tanto, el número total de operaciones a realizar vendrá dado por:

$$N^{op} = N_{LOS}^{op} + N_{no-LOS}^{op} = N_e + N K \quad (3.31)$$

En definitiva, respecto al modelo anterior, se consigue un factor de aceleración S definido por:

$$S = \frac{N_e + N.N_e.K}{N_e + N.K} = \frac{N_e(1 + N.K)}{N_e + N.K} \approx \frac{N_e(N.K)}{N.K} = N_e \quad (3.32)$$

Como se puede observar, el factor de aceleración se puede aproximar al número de elementos o divisiones N_e , puesto que normalmente se cumple que $N.K \gg N_e > 1$.

Con el fin de validar el cálculo de la potencia óptica de ruido debida a la iluminación natural mediante la utilización de este nuevo modelo, se han comparado los resultados derivados de computar la simulación de un mismo escenario o ambiente de interior (Figura 3.6), empleando este nuevo modelo, basado en considerar a la ventana como un único emisor, y el modelo que consiste en dividir la superficie de la ventana presente en el recinto en múltiples elementos emisores. Los parámetros usados en las simulaciones coinciden con los utilizados en [Carruthers00, Jivkova00], los cuales se detallan en la Tabla 3-1. Se ha considerado que el receptor, localizado en la posición (1,57 m, 0,95 m, 1 m) y orientado verticalmente hacia el techo, está formado por un fotodetector de área 1 cm^2 , y un concentrador óptico ideal no formador de imagen con un FOV de 60° e índice de refracción $n_c = 1,44$, lo que supone una ganancia de $n_c^2/\text{sen}^2(\text{FOV}) = 2,76$. Los resultados obtenidos con ambos modelos se muestran

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

Tabla 3-1. Parámetros de las simulaciones.

Parámetros	Valores
Recinto:	
Largo (x), m	10
Ancho (y), m	6
Alto (z), m	3
ρ (ventana)	0,04
ρ (paredes)	0,60
ρ (techo)	0,70
ρ (suelo)	0,20
Emisores:	
Índice modal (n)	1
Posición {x, y, z}	0, -, -
Elevación	90°
Acimut	0°
Receptor:	
Área	1 cm ²
FOV	60°
Ganancia	2,76
Posición {x, y, z}	1,57, 0,95, 1
Elevación	0°
Acimut	0°

Tabla 3-2. Comparación de los modelos para cálculo del ruido debido a la luz natural.

	Modelo tradicional	Modelo propuesto
N_e	7.200	1
P_E/N_e	25 mW	180 W
N	500.000	500.000
K	3	3
N_{LOS}^{op}	7.200	7.200
N_{no-LOS}^{op}	10,8 x 10 ⁹	1,5 x 10 ⁶
P_{nat}^{LOS}	2,06 x 10 ⁻⁴ W	2,06 x 10 ⁻⁴ W
P_{nat}^{no-LOS}	3,54 x 10 ⁻⁴ W	3,54 x 10 ⁻⁴ W
P_{nat}^{total}	5,60 x 10 ⁻⁴ W	5,60 x 10 ⁻⁴ W

en la Tabla 3-2. Como se puede apreciar, los dos modelos proporcionan valores similares, lo que constata la validez del nuevo modelo propuesto.

Como se puede observar, dividiendo la ventana en $N_e = 7.200$ elementos de superficie o emisor de área $5 \times 5 \text{ cm}^2$ [Jivkova00], y considerando $N = 500.000$ rayos lanzados desde cada elemento emisor, con sólo $K = 3$ reflexiones como máximo, el número total de operaciones a realizar es de $10,8 \times 10^9$ ($\approx N_{no-LOS}^{op}$). Sin

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

embargo, si se utiliza el modelo propuesto, el número total de operaciones se reduce a $1,5 \times 10^6$, lo que supone un factor de aceleración de aproximadamente $S \approx N_e = 7.200$. Como ejemplo, si se utiliza un computador personal Intel Core 2 CPU 6400 2,1GHz con 1GB de RAM, el tiempo de cómputo de una operación definida por la ecuación (3.26) ó (3.27), es aproximadamente de 1,15 ms. Por lo tanto, si se utiliza el modelo de ruido propuesto en este trabajo, y teniendo en cuenta el número de operaciones mostrado en la Tabla 3-2, el cálculo de la potencia de ruido se reduce desde 135,75 días (195.480 minutos) hasta 27,28 minutos.

Como se ha mencionado, el modelo propuesto se puede aplicar a algoritmos basados en técnicas de trazado de rayos y en el método de Monte Carlo, como los propuestos por F. J. López-Hernández y S. Zhang [López-Hernández00, Zhang10]. Como se ha indicado con anterioridad, una de las peculiaridades del método de Monte Carlo es que, independientemente del problema considerado, aporta una solución de tipo aproximada con un error proporcional a $1/(N^{1/2})$ [González05a]. Por lo tanto, si se desea aumentar la precisión de los resultados habría que aumentar el número de rayos N , utilizados en la simulación. Dado el coste computacional que presentan ambos modelos en función de N , es más sencillo y factible, desde un punto de vista computacional, incrementar el número de rayos para elevar la precisión de los resultados si se utiliza el modelo propuesto en este trabajo.

3.4. Adaptación del algoritmo MMC para enlaces VLC.

Con la aparición de las lámparas LED de iluminación como alternativa a las lámparas incandescentes y fluorescentes, las comunicaciones ópticas no guiadas en el espectro visible (VLC, *Visible Light Communications*) han cobrado gran importancia y han despertado interés en los investigadores [Komine04, Langer07, Langer09]. En general, la simulación del canal óptico inalámbrico en el espectro visible, canal VLC, puede beneficiar en gran medida el estudio y el diseño de sistemas VLC de altas prestaciones. El modelo de propagación y el algoritmo de simulación MMC descrito con anterioridad, permiten computar la respuesta al impulso del canal óptico no guiado para una transmisión óptica de tipo monocromática, como es el caso del canal IR. Consecuentemente, para poder simular el canal VLC es necesario adaptar dicho algoritmo y modelo de propagación a aquellos enlaces donde la transmisión óptica comprende un amplio rango espectral.

En este apartado se describe la adaptación del modelo de propagación y algoritmo MMC, detallado con anterioridad en el apartado 3.2, para poder simular canales ópticos caracterizados por abarcar un amplio rango espectral. En la adaptación no se ha considerado el fenómeno por el cual algunos materiales son capaces de absorber una determinada gama de longitudes de onda (absorción

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

óptica), o de captar energía en ciertas longitudes de onda para posteriormente radiar en el visible (fluorescencia y fosforescencia). Tampoco se ha tenido en cuenta la dependencia del coeficiente de reflexión con el ángulo de incidencia en el proceso de reflexión, el fenómeno de esparcimiento óptico o *scattering* y la dispersión cromática debida a la dependencia del índice de refracción con la longitud de onda. La inclusión de dichos efectos constituye una de las tareas a abordar en futuras líneas de investigación.

3.4.1. Cálculo de la respuesta al impulso.

El canal VLC con IM/DD se puede modelar como un sistema lineal en banda base, y por lo tanto queda completamente caracterizado a partir de su respuesta al impulso $h(t; E, R, \lambda)$, donde λ es la longitud de onda. En general, la respuesta de impulso del canal VLC para una posición arbitraria del emisor E y del receptor R , se puede expresar como la suma de la respuesta al impulso por visión directa entre el emisor y el receptor $h^{(0)}(t; E, R, \lambda)$, y la respuesta al impulso debida a la señal que alcanza al receptor después de sufrir una o más reflexiones $h^{(k)}(t; E, R, \lambda)$, es decir:

$$h(t; E, R, \lambda) = h^{(0)}(t; E, R, \lambda) + \sum_{k=1}^{\infty} h^{(k)}(t; E, R, \lambda) \quad (3.33)$$

donde k es el número de reflexiones que sufre la señal antes de alcanzar al receptor, y t es el tiempo.

Si se considera que la distancia entre el emisor y el receptor es muy superior a las dimensiones de la superficie del receptor, en un entorno carente de superficies reflectoras (Figura 3.2), la respuesta al impulso por visión directa entre el emisor y el receptor se puede expresar de manera aproximada por:

$$h^{(0)}(t; E, R, \lambda) = \frac{1}{(d_{0,R})^2} R_E(\phi, n, \lambda) A_{ef}(\psi) \delta\left(t - \frac{d_{0,R}}{c}\right) \quad (3.34)$$

donde, a diferencia de la ecuación (3.6), ahora $R_E(\phi, n, \lambda)$ representa el diagrama de radiación del emisor en función de la longitud de onda λ , el cual se ha modelado según un perfil Lambertiano generalizado de índice modal n , con simetría axial e independiente de γ , según la siguiente ecuación:

$$R_E(\phi, n, \lambda) = \frac{n+1}{2\pi} P_E(\lambda) \cos^n(\phi), \quad -\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2, \quad 0 \leq \gamma \leq 2\pi \quad (3.35)$$

Integrando $P_E(\lambda)$ sobre λ , se obtiene la potencia total P_E emitida por el emisor. El cálculo de la respuesta al impulso, en el caso de que la señal transmitida llegue al receptor sufriendo al menos una reflexión (Figura 3.3), se

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

realiza haciendo uso de la técnica de trazado de rayos y del método de Monte Carlo. Es decir, se genera un número elevado de rayos que parten desde el emisor y que se orientan de manera aleatoria en base a una distribución de probabilidad confeccionada a partir de $R_E(\phi, n, \lambda)$. La potencia de cada uno de los rayos es inicialmente $P_E(\lambda)/N(\lambda)$, donde $N = N(\lambda)$ son los rayos usados para discretizar el diagrama de radiación del emisor para cada λ . Cuando un rayo alcanza una superficie, el punto donde se produce la colisión se considera una nueva fuente óptica, generándose un nuevo rayo, con una orientación aleatoria que ahora se obtiene a partir del modelo de reflexión de la superficie donde se ha producido la colisión. Después de cada reflexión, la potencia del rayo es reducida por el coeficiente de reflexión de la superficie, y se determina la potencia reflejada que es detectada por el receptor. El proceso continua hasta que no se supere el tiempo máximo de simulación, t_{max} .

Para cada λ , la contribución de potencia a la respuesta al impulso debida al i -ésimo rayo ($1 \leq i \leq N$) después de k reflexiones, se puede expresar como:

$$P_{i,k}(E, R, \lambda) = \frac{1}{(d_{k,R})^2} R_S(\phi_{k,R}, \phi', \lambda) A_{ef}(\psi_{k,R})$$

$$t_{i,k} = \left(\sum_{j=1}^k \frac{d_{j-1,j}}{c} \right) + \frac{d_{k,R}}{c} \quad (3.36)$$

donde $t_{i,k}$ representa el instante de tiempo en el cuál la potencia es detectada por el receptor y $R_S(\theta_{k,R}, \theta', \lambda)$ es el patrón de reflexión que para cada longitud de onda presenta la superficie donde se ha producido la k -ésima reflexión, el cual se ha aproximado mediante el modelo de Phong. A partir de la ecuación (3.4), el modelo de Phong en función de λ se puede reescribir como:

$$R_S(\phi_{k,R}, \phi', \lambda) = \rho_k(\lambda) P_{inc}(\lambda) \left(\frac{r_d(\lambda)}{\pi} \cos(\phi_{k,R}) + [1 - r_d(\lambda)] \frac{m(\lambda) + 1}{2\pi} \cos^m(\phi_{k,R} - \phi') \right) \quad (3.37)$$

Según el modelo, para cada longitud de onda, las superficies quedan definidas mediante tres parámetros: el coeficiente de reflexión $\rho_k(\lambda)$, el porcentaje de señal que es reflejada de manera difusa $r_d(\lambda)$ y la directividad de la componente especular de reflexión $m(\lambda)$. Además, $\phi_{k,R}$ y ϕ' representan los ángulos de observación e incidencia, respectivamente, y $P_{inc}(\lambda)$, la potencia óptica del rayo incidente antes de sufrir la k -ésima reflexión, la cual se puede expresar como:

$$P_{inc}(\lambda) = \frac{P_E(\lambda)}{N} \prod_{j=1}^{k-1} \rho_j(\lambda) \quad (3.38)$$

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: <http://sede.ull.es/validacion>

Identificador del documento: 866822

Código de verificación: fbsse0hw

Firmado por:	Fecha:
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

Sumando las contribuciones de potencia $P_{i,k}$ dadas por (3.36) para el número total de rayos N , cada uno sufriendo un máximo de K reflexiones, y usando la función delta de Dirac para simbolizar los instantes de tiempo $t_{i,k}$, se obtiene la expresión que define la respuesta al impulso debida a múltiples reflexiones, como:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{\infty} h^{(k)}(t; E, R, \lambda) &= \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K P_{i,k}(E, R, \lambda) \cdot \delta(t - t_{i,k}) = \\ &= \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \frac{1}{(d_{k,R})^2} R_S(\phi_{k,R}, \phi', \lambda) A_{ef}(\psi_{k,R}) \cdot \delta\left(t - \left(\sum_{j=1}^k \frac{d_{j-1,j}}{c}\right) - \frac{d_{k,R}}{c}\right) \end{aligned} \quad (3.39)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.34) y (3.39) en (3.33), la respuesta al impulso total para cada longitud de onda se puede expresar como:

$$\begin{aligned} h(t; E, R, \lambda) &= \frac{1}{(d_{0,R})^2} R_E(\phi, n, \lambda) A_{ef}(\psi) \delta\left(t - \frac{d_{0,R}}{c}\right) + \\ &+ \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \frac{1}{(d_{k,R})^2} R_S(\phi_{k,R}, \phi', \lambda) A_{ef}(\psi_{k,R}) \cdot \delta\left(t - \left(\sum_{j=1}^k \frac{d_{j-1,j}}{c}\right) - \frac{d_{k,R}}{c}\right) \end{aligned} \quad (3.40)$$

Definiendo $M = t_{max}/\Delta t$, y asumiendo como origen de tiempos el instante de llegada de la componente LOS, el histograma de la respuesta al impulso se puede expresar por:

$$\begin{aligned} h(t; E, R, \lambda) &= \frac{1}{(d_{0,R})^2} R_E(\phi, n, \lambda) A_{ef}(\psi) \delta(t) + \\ &+ \sum_{n=1}^{M-1} \sum_{i=1}^{N_n} \sum_{k=1}^{K_n} \frac{1}{(d_{k,R})^2} R_S(\phi_{k,R}, \phi', \lambda) A_{ef}(\psi_{k,R}) \cdot \delta(t - n \Delta t) \end{aligned} \quad (3.41)$$

donde n simboliza el intervalo de tiempo n -ésimo de ancho Δt . Además, K_n y N_n representan el número de reflexiones del i -ésimo rayo y el número de rayos que contribuyen en el intervalo de tiempo n -ésimo, respectivamente.

La ecuación anterior también se puede expresar de la forma:

$$h(t; E, R, \lambda) = \frac{1}{(d_{0,R})^2} R_E(\phi, n, \lambda) A_{ef}(\psi) \delta(t) + \sum_{n=1}^{M-1} P_n(E, R, \lambda) \cdot \delta(t - n \Delta t) \quad (3.42)$$

donde P_n representa la potencia total detectada por el receptor en el intervalo de tiempo n -ésimo. El cálculo de P_n se obtiene sumando todas las potencias debidas a los N_n rayos que contribuyen en ese intervalo de tiempo, de la forma:

$$P_n(E, R, \lambda) = \sum_{i=1}^{N_n} P_{i,n}(E, R, \lambda) = \sum_{i=1}^{N_n} \sum_{k=1}^{K_n} \frac{1}{(d_{k,R})^2} R_S(\phi_{k,R}, \phi', \lambda) A_{ef}(\psi_{k,R}) \quad (3.43)$$

donde $P_{i,n}$ es la potencia total que incide en el receptor en el intervalo de tiempo n -ésimo debida a la propagación del rayo i -ésimo ($i = 1, 2, 3, \dots, N_n$).

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: <http://sede.ull.es/validacion>

Identificador del documento: 866822

Código de verificación: fbsse0hw

Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

3.4.2. Evaluación del error debido al método de Monte Carlo.

Las ecuaciones mostradas para evaluar el error cometido debido al método de Monte Carlo al computar la respuesta al impulso del canal óptico no guiado para una transmisión óptica de tipo monocromática, como es el caso del canal IR, se pueden extender para el caso de una transmisión que abarca un amplio rango espectral, tal y como acontece en los sistemas VLC. Por lo tanto, en este apartado se presenta una adaptación de las expresiones analíticas expuestas en el apartado 3.2.5, que permite evaluar dicho error para diferentes longitudes de onda [Rodríguez13a].

Por lo tanto, a partir de la ecuación (3.21), la expresión que define el error absoluto debido al método de Monte Carlo al computar la respuesta al impulso del canal VLC, se puede evaluar mediante:

$$\varepsilon(P_n(\lambda)) = \sqrt{\text{var}(P_n(\lambda))} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_n} P_{i,n}^2(\lambda) - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^{N_n} P_{i,n}(\lambda) \right)^2} \quad (3.44)$$

donde $P_{i,n}$ es la potencia total que incide en el receptor en el intervalo de tiempo n -ésimo debida a la propagación del rayo i -ésimo, N es el número total de rayos generados desde la posición del emisor para cada λ y N_n es el número de rayos que contribuyen en ese intervalo de tiempo. De igual forma, partiendo de la expresión (3.22), el error relativo en un intervalo de tiempo Δt se puede describir por:

$$\varepsilon_r(P_n(\lambda)) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_n} P_{i,n}^2(\lambda)}}{\left(\sum_{i=1}^{N_n} P_{i,n}(\lambda) \right)^2} - \frac{1}{N} \quad (3.45)$$

Si se considera que ΔT es el tiempo transcurrido entre el instante inicial de simulación y cualquier otro instante posterior, la ecuación (3.45) nos permite determinar el error acumulado durante todo ese tiempo de simulación. De esta forma, el error relativo acumulado para un intervalo de tiempo ΔT viene descrito por:

$$\varepsilon_r(P_n(\lambda)) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\Delta T}} P_{i,n}^2(\lambda)}}{\left(\sum_{i=1}^{N_{\Delta T}} P_{i,n}(\lambda) \right)^2} - \frac{1}{N_f} \quad (3.46)$$

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: <http://sede.ull.es/validacion>

Identificador del documento: 866822

Código de verificación: fbsse0hw

Firmado por:	Fecha:
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

Tabla 3-3. Parámetros de configuración.

Parámetros		Valores			
Emisor:	Posición: (x, y, z) , m	(-0,25, 0,14, 0,83)			
	Orientación: elevación, acimut	90°, 330°			
	Índice modal (n)	1			
	Potencia ($P_E(\lambda)$), W	1/3			
Receptor:	Posición: (x, y, z) , m	(-0,33, 0,24, 0,91)			
	Orientación: elevación, acimut	90°, 330°			
	FOV	85°			
	Área activa (A_R), cm ²	1			
	Responsividades (R,G,B), A/W	(0,41, 0,3, 0,2)			
Parámetros simulación:	Nº de rayos ($N(\lambda)$)	500.000			
	Nº de reflexiones (k)	10			
	Resolución (Δt), ns	0,2			
	Tiempo máximo ($t_{máx}$), ns	120			
	Potencia mínima ($P_{mín}$), pW	1			
Materiales:	ρ_{Azul}	ρ_{Verde}	ρ_{Rojo}	$r_r(\forall\lambda)$	$m(\forall\lambda)$
Tipo 1: madera	0,25	0,43	0,73	1	---
Tipo 2: mármol blanco	0,70	0,77	0,82	0,5	230
Tipo 3: aluminio	0,45	0,49	0,52	0,3	250
Tipo 4: pintura negra	0,03	0,04	0,04	0	138

donde N_{AT} es el número de rayos que inciden en el receptor durante dicho intervalo de tiempo ΔT y N_f es el número de vuelos que se han producido durante dicho intervalo ΔT .

3.4.3. Resultados de simulación de un enlace VLC.

En este apartado se muestra un ejemplo de simulación de la respuesta al impulso del canal de un enlace VLC, operando en las longitudes de onda del rojo, verde y azul (RGB), en el interior de un recinto con forma de prisma hexagonal de un metro de alto, y en la que están presentes diferentes objetos u obstáculos (Figuras 3.7 y 3.8).

Los parámetros que caracterizan tanto el emisor y el receptor, así como los parámetros que definen el modelo de Phong utilizado para aproximar el diagrama de reflexión de las superficies que conforman el ambiente de interior, se muestran en la Tabla 3-3. La definición del entorno de simulación y la implementación del modelo y algoritmo de simulación se realizó con la ayuda de la herramienta de software Matlab®. El recinto con forma de prisma hexagonal ha sido modelado utilizando 416 superficies reflectoras triangulares y se han considerado cuatro tipos de materiales con diferentes características reflectantes en el espectro visible

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

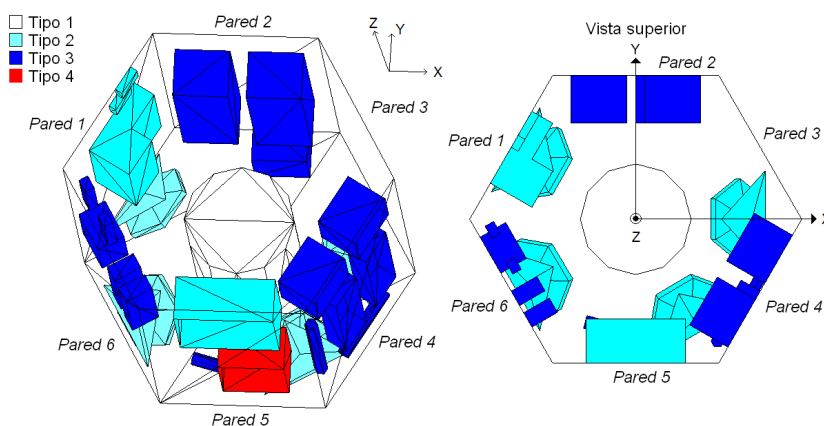


Figura 3.7 Representación gráfica del interior de un recinto con forma de prisma rectangular.

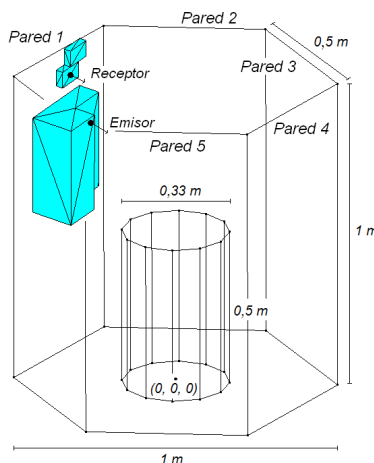


Figura 3.8 Dimensiones y localizaciones del emisor y del receptor.

[Baldridge09]. Como se puede observar en la Figura 3.8, tanto el emisor como el receptor se encuentran localizados sobre elementos de la pared 1 y orientados hacia el interior del recinto, de tal forma que imposibilita que se pueda establecer un enlace de comunicación tipo LOS entre ambos.

En la Figura 3.9 se presentan las respuestas al impulso calculadas para las longitudes de onda correspondientes al modelo de colores básicos RGB, donde $\lambda_{\text{Rojo}} = 635 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{Verde}} = 525 \text{ nm}$ y $\lambda_{\text{Azul}} = 455 \text{ nm}$. En estos resultados, se observa

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

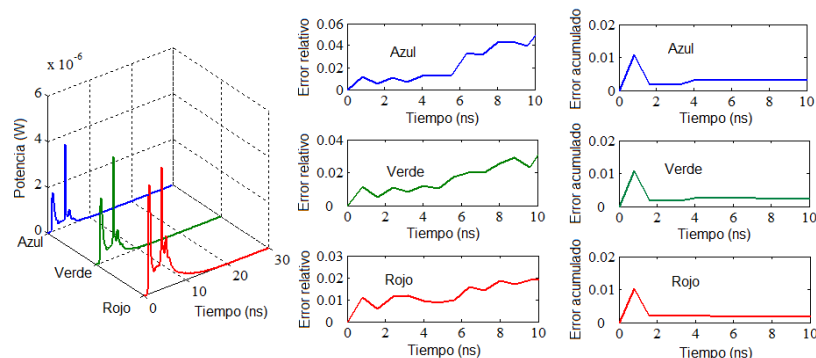


Figura 3.9 Respuesta al impulso y errores relativos obtenidos para las longitudes de onda RGB ($\lambda_{\text{Rojo}} = 635 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{Verde}} = 525 \text{ nm}$ y $\lambda_{\text{Azul}} = 455 \text{ nm}$).

que las respuestas al impulso presentan una distribución temporal similar para cada una de las longitudes de onda consideradas, aunque con diferentes niveles de potencia. Esto es debido a que en la simulación, al caracterizar las superficies mediante el modelo de Phong, se consideró que sólo el coeficiente de reflexión de los materiales empleados depende de la longitud de onda, mientras que los otros dos parámetros, es decir, el porcentaje de reflexión difusa y la directividad de la componente especular, se mantuvieron constantes e independientes de λ (ver Tabla 3-3). Asimismo, en la misma Figura 3.9, también se muestran para cada longitud de onda RGB, las evaluaciones de los errores relativos y los errores relativos acumulados obtenidos utilizando las ecuaciones (3.45) y (3.46), respectivamente. Al igual que en las respuestas al impulso, las curvas de los errores también presentan una forma similar. Las pequeñas diferencias se deben a la naturaleza aleatoria del algoritmo de simulación. En los resultados se puede ver que los errores relativos en las respuestas al impulso obtenidas, son inferiores al 5%, y se puede comprobar que el valor máximo obtenido del error relativo acumulado es menor al 0,3%, correspondiéndose este valor con el obtenido para la longitud de onda del azul, lo que indica el alto nivel de confianza en las respuestas al impulso obtenidas.

En contraste con otros métodos [Lee11, Barry93], el algoritmo MMC adaptado para comunicaciones VLC, permite la evaluación de la respuesta de impulso para entornos con geometrías complejas sin aumento significativo en el coste computacional, especialmente si se desea una buena resolución temporal y se emplean un número elevado de reflexiones. Esto puede demostrarse haciendo un análisis del número de cálculos elementales que requiere este algoritmo para determinar la respuesta al impulso y compararlo con otros algoritmos iterativos, como el desarrollado por J. R. Barry [Barry93]. Con el algoritmo de trazado de

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

rayos el número de cálculos elementales requeridos es igual a $k.N.N_F$, donde N es el número de rayos generados para cada longitud de onda, k es el número de reflexiones, y N_F es el número de elementos de superficie en los que se ha discretizado el recinto o entorno de simulación. Por tanto, dado que el número de rayos considerados por longitud de onda es de $N = 500.000$, el número de elementos de superficie o triángulos utilizados para definir la escena es de $N_F = 416$, y el número de reflexiones es de $k = 10$, el número de cálculos elementales por longitud de onda es de $2,08 \times 10^9$. En el algoritmo propuesto por J. R. Barry, el número total de cálculos elementales N_C^k , depende del número de elementos reflectantes N_C , en los que se ha dividido la escena y del tamaño de las superficies o área total. Si el área total de las superficies reflectantes consideradas en el recinto bajo estudio ($7,78 \text{ m}^2$) se divide en $N_C = 778$ elementos de superficie, es decir, se utiliza un elemento de área de 100 cm^2 para poder obtener una resolución temporal de $0,2 \text{ ns}$, el número de cálculos elementales realizados sería de $8,1 \times 10^{28}$, lo que supone un número de computaciones elementales de aproximadamente 10^{19} veces más que las que requiere MMC.

Por último, indicar que la ejecución de la simulación con el algoritmo MMC en un cluster Debian GNU/Linux dual-core Intel Xeon 3,20 GHz con 1GB RAM, requirió un total de 1.260 segundos, es decir, aproximadamente 21 minutos.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21



Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: <http://sede.ull.es/validacion>

Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

Capítulo 4

Mejora gráfica y computacional del programa de simulación del canal óptico no guiado

En el capítulo anterior se ha descrito el modelo de propagación utilizado para definir el efecto de los principales elementos presentes en un enlace óptico no guiado, y el algoritmo de simulación basado en el uso de técnicas de trazado de rayos y en el método de Monte Carlo, que conjuntamente han permitido desarrollar una herramienta de simulación que posibilita la caracterización de aquellos enlaces inalámbricos que utilizan como medio de transmisión el canal IR o el VLC [Lopez-Hernández00, Rodríguez02, González05a, Rodríguez13a].

En este capítulo se incorporan dos mejoras orientadas a facilitar y extender el uso de dicha herramienta de simulación y a disminuir su tiempo de ejecución. La primera mejora posibilita que el usuario pueda definir el enlace de comunicación mediante la utilización de aplicaciones gráficas de diseño 3D y obtener la respuesta al impulso del canal óptico no guiado en cualquier ambiente de interior por muy complejo que éste sea, donde coexisten distintas fuentes emisoras y dispositivos receptores en presencia de fuentes de iluminación natural y artificial. Con la finalidad de reducir el tiempo de simulación, se han llevado a cabo dos optimizaciones basadas en mejorar la propagación de los rayos en el interior del entorno de simulación y en la paralelización del algoritmo de simulación. La primera permite reducir el tiempo de ejecución por encima del treinta por ciento, y la segunda, obtener una aceleración de cómputo prácticamente proporcional al número de procesadores utilizados.

A continuación, se realiza una breve introducción sobre el diseño asistido por computador, se realiza una descripción de la herramienta de simulación centrada principalmente en presentar las mejoras incorporadas, y por último se aportan algunos ejemplos de su utilización.

4.1. Diseño asistido por computador.

El Diseño Asistido por Computador, abreviado como DAO, pero más conocido por sus siglas en inglés CAD (*Computer Aided Design*), se basa en el uso de un amplio rango de herramientas computacionales que asisten a ingenieros, arquitectos y a profesionales del diseño en sus respectivas actividades [Dominguez97, Szalapaj00]. Al igual que ocurre con un dibujo manual, con un programa de CAD se puede conseguir cualquier composición por muy compleja

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

que sea, creando cuantos objetos gráficos básicos sean precisos, enlazados entre sí, hasta formar las figuras adecuadas al proyecto, procediendo a su plasmación en papel cuando esté finalizado el trabajo en pantalla. Un programa CAD es capaz de crear, modificar e imprimir figuras geométricas elementales, como: líneas, arcos, rectángulos, elipses, etc., con propiedades individuales propias: color, tipo de línea, medidas, etc. El proceso general de trabajo, se basa en dos fases: subdividir el dibujo en entidades gráficas básicas, y después, seleccionar la función que hay que ejecutar e introducir los datos que solicita el programa, repitiendo esta acción cuantas veces sea necesario.

Las ventajas de un sistema CAD no están únicamente en la posibilidad de dibujar con facilidad piezas o productos deseados, sino que además es capaz de proporcionar: información sobre las características de la pieza desarrollada (dimensiones, superficie, volumen, peso o material con el cual se elaborará, etc.), diferentes visualizaciones del modelo dibujado (perspectiva caballera, isométrica, etc.), planos y esquemas del conjunto diseñado y presupuestos.

4.1.1. Tipos de programas CAD.

A la hora de elegir un programa CAD, la primera característica a tener en cuenta es el carácter de la aplicación. Dependiendo de sus posibilidades cada programa va dirigido a un sector de usuarios determinado, pudiéndose distinguir entre programas de carácter básico, general o específico. Un programa es de carácter básico cuando es sencillo de utilizar y ha sido concebido para la enseñanza o para trabajar con dibujos de poca complejidad. Cuando un programa puede trabajar con dibujos profesionales, pero no ha sido creado para ningún sector en especial, se dice que es de carácter general. Cuando ha sido creado para ser usado únicamente dentro de un sector específico se considera de tipo específico. Así, nos podemos encontrar con programas específicos para la industria mecánica, electrónica, para sistemas de redes, ya sean éstas eléctricas, telefónicas o de tuberías, aplicaciones para la ingeniería civil, para la química, aplicaciones para el diseño o artes gráficas, para cartografía, arquitectura, etc.

Otra de las características que se debe considerar, es el sistema de trabajo con el que ha sido diseñado el programa CAD. En general, podemos encontrar dos sistemas de trabajo, el primero, consiste en trabajar con medidas y unidades reales, es decir, el programa ha sido diseñado para trabajar sin límites de espacio. En este caso, no hay que preocuparse de las escalas y los formatos de papel hasta que llegue el momento de trazar el dibujo. En cambio, si el programa ha sido creado para trabajar con formatos de papel y escalas desde el principio, como el trabajo de la delineación manual, implica un serio recorte de libertad. Es más lógico trabajar con dimensiones reales en el proceso de diseño y con escalas y papeles en el trazado.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

Otro aspecto a tener en cuenta, son los diferentes formatos y tipo de gráficos. Los programas que manejan gráficos, básicamente lo hacen mediante dos sistemas: gráficos de mapa de bits, o bien, gráficos vectoriales. Los primeros, también se pueden denominar gráficos matriciales, y son gráficos realizados y almacenados como colecciones de bits que describen las características de cada uno de los píxeles individuales de la pantalla, así como, los datos generales del gráfico, como: tamaño, paletada color o resolución. En estos gráficos se tratan las imágenes como un conjunto de puntos y, a diferencia de los vectoriales, no son escalables y, aún pudiendo variar su tamaño, la ampliación o reducción supone una pérdida notable de la calidad del gráfico. Entre los tipos de archivo de mapa de bits más comunes se encuentran: JPG, PCX, PNG, TIFF, GIF y BMP.

El segundo sistema se basa en los gráficos vectoriales, que son gráficos de ordenador basados en el uso de elementos de construcción como líneas, curvas, círculos y rectángulos. Los gráficos orientados a objetos, describen un dibujo matemáticamente, como un conjunto de instrucciones que crean los elementos de la imagen, con lo cual es sencillo manipular los objetos como unidades completas estratificándolos, girándolos, escalándolos, etc., con relativa facilidad. Se utilizan sobre todo en el diseño técnico con programas de tipo CAD y para la generación de escenas 3D. Entre los tipos de archivo vectoriales más comunes tenemos: DXF, 3DS, IGES, VRML, SVG y SWF.

La principal diferencia entre los mapas de bits y los gráficos vectoriales está en su tamaño. Los gráficos vectoriales tienen la gran ventaja de que ocupan mucho menos espacio en disco o en memoria. Para generar un gráfico de mapa de bits, es necesario almacenar y trabajar con una gran cantidad de información por la necesidad de mantener los datos de cada píxel. Sin embargo, para representar una imagen vectorial se considera que el gráfico está formado por un conjunto de vectores o líneas. Esto es una gran ventaja, ya que una línea, que en el caso de un mapa de bits estaría compuesta por muchos píxeles, en una imagen vectorial solo se necesita almacenar información sobre su principio, su final, su dirección y su longitud. Esto es así con las líneas y con cualquier figura más compleja. Por ejemplo, podríamos representar un círculo simplemente guardando la información de su centro y su radio, además de indicar el color de contorno y el de fondo.

Por otro lado, no todos los programas CAD ofrecen las mismas prestaciones y no todas las aplicaciones requieren el mismo nivel. Algunos trabajan sólo en dos dimensiones, otros llegan hasta las dos dimensiones y media, mientras que los más completos son capaces de trabajar en tres dimensiones y unos pocos trabajan con sólidos (Figura 4.1). Los programas de dos dimensiones (2D), permiten definir y manipular elementos de geometría en el plano, o sea, que para definir un punto, se necesitan dos coordenadas. Los programas de dos dimensiones y media (2+D/2) son los que son capaces de trabajar con dibujos planos en diferentes

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

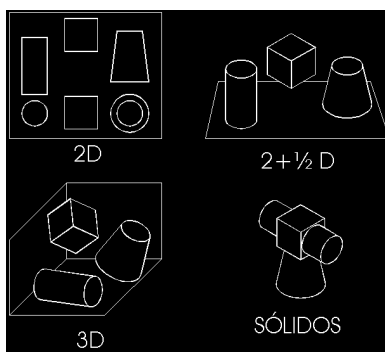


Figura 4.1. Dimensiones en programas CAD.

niveles o capas, para conseguir efectos tridimensionales. Sus puntos se definen en dos coordenadas, pero admitiendo diferentes elevaciones. Por último, están los programas capaces de trabajar con dibujos espaciales, éstos alcanzan el nivel de tres dimensiones (3D) y sus puntos están definidos por tres coordenadas.

4.1.2. Definición de gráficos o escenas 3D.

Existen tres tipos de programas CAD que trabajan en tres dimensiones, y se clasifican en función del método aplicado, en: hilo o jaula de alambre (*wireframe*), técnica de mallas y modelado sólido. En el primero, un modelo está representado por puntos conectados por entidades geométricas simples tales como líneas, que permiten mostrar el contorno del modelo. No distingue entre sólido y aire, ni conoce la superficie, tan sólo los puntos. Su ventaja radica en la facilidad de uso. La técnica de mallas es una extensión del método anterior, con los puntos es capaz de definir matemáticamente las superficies que conforman el contorno del modelo, aunque tampoco distingue entre sólido y aire. Finalmente, el modelado sólido, es una representación matemática del diseño. El sistema reconoce que es sólido y que es aire. En este sentido, existen dos tipos de modeladores, el GSC (*Constructive Solid Geometry*) que trabaja con modelos sólidos elementales aplicando operaciones de traslación, rotación, escalado, simetrización y operaciones booleanas hasta conseguir el sólido deseado. Y el BREP (*Boundary Representation*) que trabaja con vértices, caras y extremos y su relación entre ellos.

En general, la creación de gráficos o escenas 3D suele componerse de cinco fases [Danaher04]: el modelado, el texturizado, la iluminación, la animación y el renderizado. La etapa de modelado consiste en dar forma a los objetos individuales que luego serán usados en la escena. El texturizado permite definir la forma en que la luz afecta a la escena. En la fase de iluminación se permite crear distintos tipos de luces puntuales, direccionales en área o volumen, con distinto

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21



Figura 4.2. Sistemas CAD en el diseño o estudio de interiores.

color o propiedades. Esta fase es un elemento clave para posteriormente realizar la animación. Los objetos se pueden animar en cuanto a transformaciones básicas en los tres ejes (rotación, escala o traslación) o en cuanto a forma. Esta última se puede conseguir mediante esqueletos o mediante deformadores. Finalmente, el proceso del renderizado, permite generar la imagen 2D o la animación a partir de la escena 3D creada. Con este fin se han desarrollado muchos métodos especiales: *rénder de alambre*, *rénder basado en polígonos*, *scanline rendering*, *raytracing*, *radiosidad* o *mapeado de fotones*.

Existen multitud de sistemas CAD utilizados para el modelado de interiores y animación 3D (Figura 4.2). Entre los paquetes con mayor popularidad se encuentran el software Maya [Maya] y el paquete 3D Studio Max [3DSMax], ambos desarrollados por la empresa Autodesk, utilizados sobre todo para el desarrollo de videojuegos, así como para el desarrollo de proyectos de animación de películas, efectos especiales y en arquitectura. Otro, es el paquete gráfico y de animación actualmente desarrollado por la empresa NewTek bajo el nombre Lightware 3D [Lightware] que está siendo utilizado en multitud de productoras de efectos visuales. El Softimage XSI [Softimage], es otra herramienta útil para la creación de animaciones y es el mayor contrincante de Maya. Otro ejemplo es el SketchUp [Sketchup] programa computacional de modelaje y diseño en 3D encaminado a la arquitectura, ingeniería civil o desarrollo de videojuegos, que fue adquirido por Google, y empleado para las imágenes de Google Earth. Dentro de este grupo de paquetes también se encuentra la herramienta multiplataforma y de software libre denominada Blender [Blender], para la creación de contenido 3D que abarca desde el modelado y animación hasta la composición y renderización de complejas escenas de 3D.

Al existir tantos tipos de paquetes de modelado y diseño 3D aparece la problemática de la compatibilidad entre las distintas aplicaciones. La complejidad de los formatos 3D dificulta notablemente la creación de un estándar que permita el intercambio de los ficheros 3D entre aplicaciones. Por ello, lo que ha ocurrido en cierto modo es que los formatos de fichero que se han impuesto, haciendo las

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/03/2017 02:32:55
	En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/03/2017 08:31:53
	En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	14/03/2017 13:45:07
	En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	14/03/2017 21:06:21
	En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	

veces de un estándar, han sido los de las aplicaciones que más dominan en este campo.

En nuestro caso, para definir el enlace de comunicación y los recintos de interior o escena 3D donde se realizará la simulación, se ha optado por utilizar el formato de ficheros 3DS por ser uno de los más completos y extendidos actualmente [Velsen97]. Este formato, ofrece una manera directa de exportar modelos a una amplia gama de programas de diseño 3D con una fidelidad superior a la de otros formatos. En su origen, fue el formato de fichero nativo de la aplicación 3D Studio desarrollada por la empresa Autodesk. El fichero binario en formato 3DS contiene información de las mallas, atributos de los materiales, referencias a mapas de bits, datos de texturas, configuraciones de vistas, posiciones de las cámaras, luminosidad e incluso datos de animación de objetos. Las mallas conforman los elementos u objetos de la escena y están formados por un conjunto o lista de triángulos. Cada uno de estos triángulos, también denominados caras, está compuesto por tres vértices y tiene asociadas unas propiedades propias relacionadas con el tipo de material del que está compuesto, visibilidad, etc. En definitiva, entre los programas de diseño existentes se puede utilizar cualquiera que ofrezca la opción de exportación a formato 3DS. En este trabajo se han empleado las herramientas de diseño AutoCAD y Blender, esta última por ser multiplataforma (disponible para Windows, Mac OS X, Linux, Solaris, FreeBSD e IRIX) y de software libre (gran comunidad de usuarios y desarrolladores).

4.2. Descripción de la herramienta de simulación.

La herramienta de simulación consta de dos partes perfectamente diferenciadas. La primera de ellas se encarga de interpretar el fichero donde se ha especificado la geometría del entorno de simulación o escena 3D en cuyo interior se establece el enlace, los objetos u obstáculos presentes en su interior, los tipos de materiales empleados, así como las localizaciones y orientaciones de los emisores y los receptores. Como se comentó en el apartado anterior, el usuario puede generar dicho fichero con la ayuda de cualquier programa CAD de diseño 3D que posibilite la exportación en un formato 3DS. La segunda parte contiene la aplicación encargada de ejecutar la simulación de la propagación de la señal óptica no guiada, es decir, implementa el algoritmo de simulación de Monte Carlo modificado (MMC) y el modelo de propagación o modelos matemáticos utilizados para caracterizar el efecto de los elementos presentes en el enlace (emisores, receptores y superficies de reflexión), los cuales han sido descritos en el capítulo anterior.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

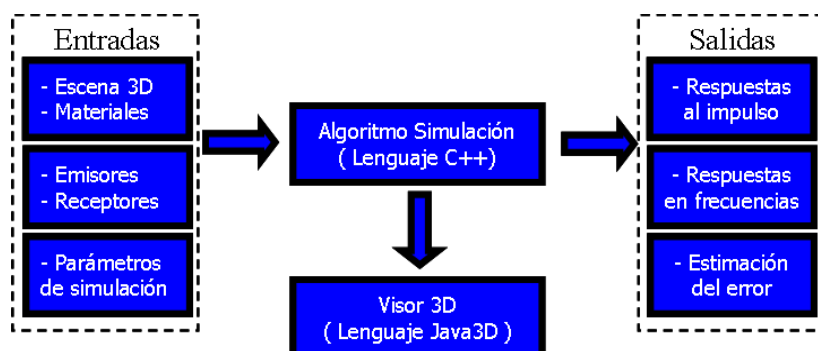


Figura 4.3. Diagrama de bloques de la herramienta de simulación desarrollada.

En la Figura 4.3 se muestra el diagrama de bloques de la herramienta de simulación desarrollada. Como se puede observar, una vez definida la geometría del entorno de simulación, los tipos de materiales, los emisores y los receptores, para cada pareja de emisor y receptor, se obtienen principalmente como salidas la respuesta al impulso del canal, así como los errores absolutos y relativos debidos al método en el que se basa el algoritmo de simulación MMC, en función de las longitudes de onda simuladas. Por último, indicar que el lenguaje de programación utilizado para implementar la herramienta de simulación ha sido C++.

4.2.1. Definición del entorno de simulación.

A la hora de diseñar el entorno de simulación o escena 3D que define el recinto en cuyo interior se establecerá el enlace óptico inalámbrico, existe un conjunto de reglas que se deben cumplir para que dicho entorno pueda ser utilizado por la herramienta de simulación. A continuación se detallan el conjunto de pautas que se deben seguir en el diseño del entorno de simulación (geometría del recinto, obstáculos y tipos de materiales), y en la definición de las localizaciones y orientaciones de los emisores y receptores que participan en la simulación.

Para diseñar gráficamente el recinto donde se realizará la simulación es necesario crear el conjunto de objetos (cubos, conos, planos, esferas, prismas, etc.) que representan la disposición del entorno o escena 3D. Las dimensiones de los objetos, así como las distancias entre los mismos, serán consideradas como metros por la herramienta de simulación. Asimismo, a cada uno de los elementos u objetos que conforman el entorno, se le debe asignar una etiqueta que identifica el tipo de material por el que está constituido cada uno de ellos. En la Figura 4.4 se muestra una instantánea de la interfaz gráfica del programa de diseño Blender

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

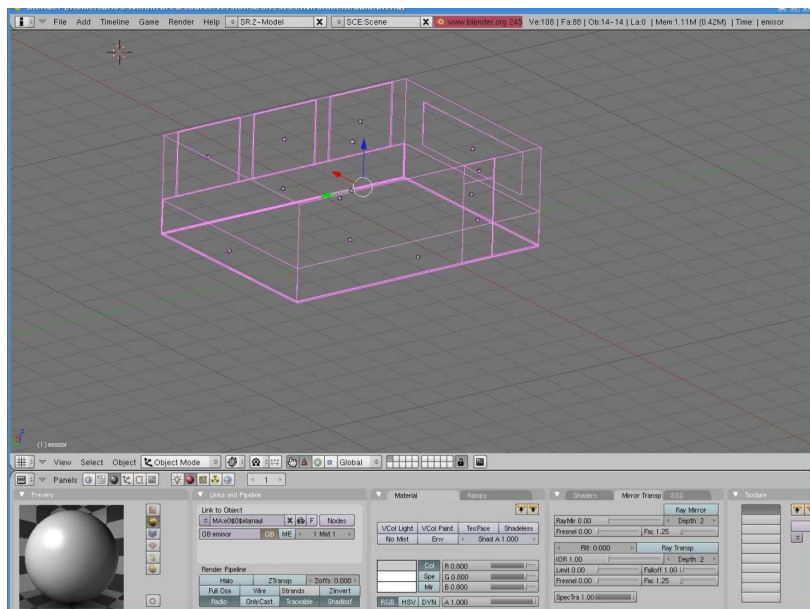


Figura 4.4. Entorno de diseño del programa Blender.

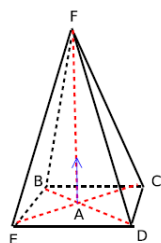


Figura 4.5. Especificación de un dispositivo emisor o receptor.

durante la definición de un entorno de simulación basado en una de las aulas de las que dispone la Sección de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad de La Laguna.

Para definir la ubicación y orientación de los dispositivos emisores y receptores, se debe crear para cada uno de ellos una pirámide cuadrangular. Tal y como se muestra en la Figura 4.5, los programas de diseño 3D representan el objeto pirámide mediante ocho caras (cuatro para la base y otras cuatro para las caras laterales) y seis vértices (cuatro para la base, uno para el centro de la base y

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

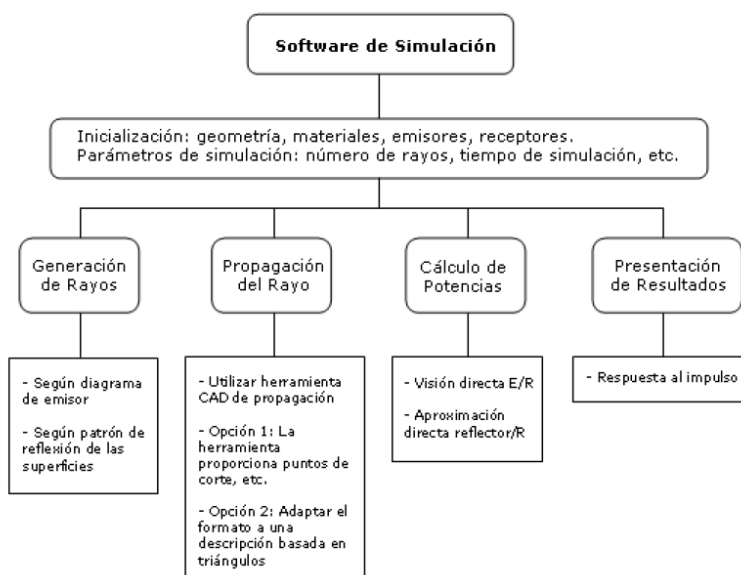


Figura 4.6. Estructura detallada de la herramienta de simulación.

uno para la cúspide). Una vez creadas las pirámides, la localización y orientación de cada uno de los dispositivos quedará fijada, respectivamente, por la posición del centro de la base de las pirámides y por la orientación del vector que une dicho centro con la cúspide. Al igual que para otro tipo de objetos, cada una de las pirámides debe tener asignado un identificador que el programa de simulación usará para determinar si se trata de un emisor o un receptor, y en cada caso, sus características de emisión o de recepción, respectivamente.

4.2.2. Interfaces de utilización de la herramienta de simulación.

En la Figura 4.6 se muestra la estructura detallada del programa de simulación desarrollado. Como se puede observar, en él se pueden distinguir los siguientes módulos o funcionalidades: inicialización del entorno/parámetros de simulación, generación de rayos, propagación del rayo, cálculo de potencias y presentación de resultados.

Una vez que se dispone del fichero en formato 3DS que contiene la definición del entorno de simulación, es decir, la geometría del recinto de interior, los tipos de materiales que lo conforman, y la localización y orientación de los emisores y receptores que intervienen en la simulación, la primera acción a realizar como parte de la inicialización de la simulación consiste en cargar e

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

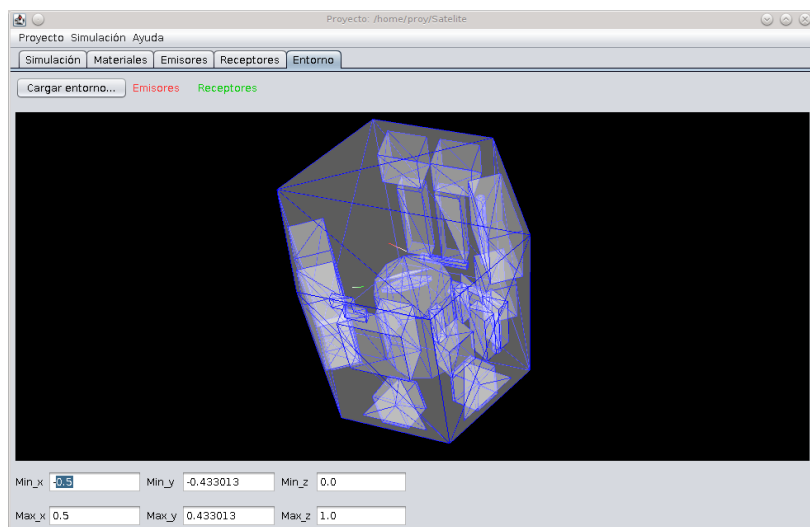
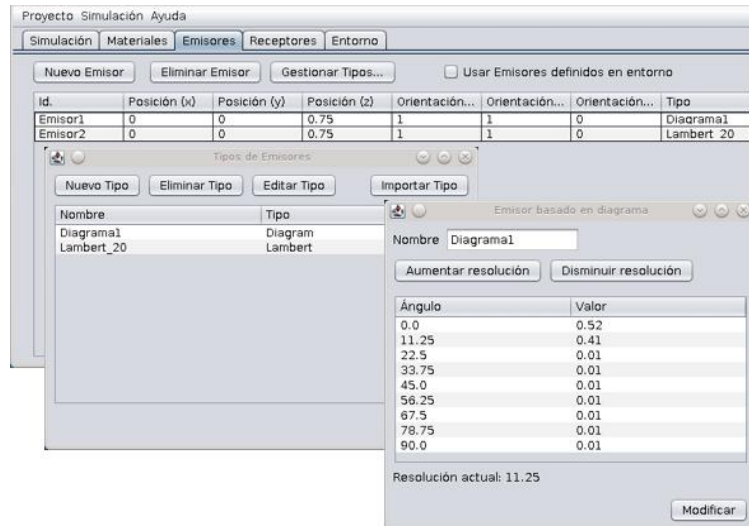


Figura 4.7. Interfaz de inicialización del entorno: pestaña entorno.

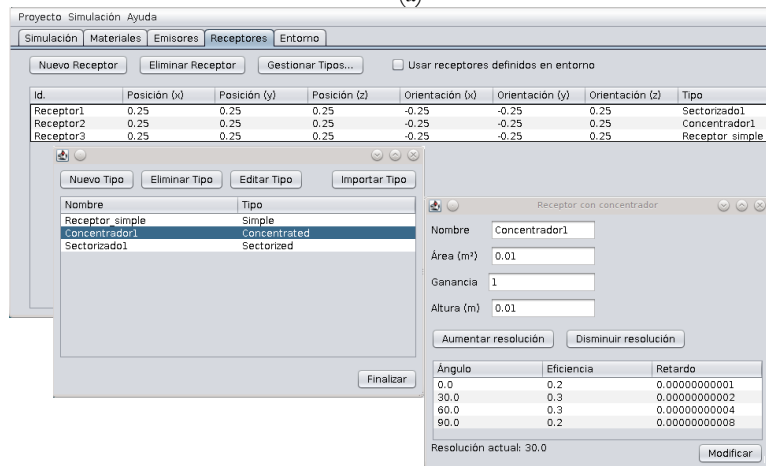
interpretar toda la información que contiene el fichero 3DS. Para efectuar dicha tarea se ha hecho uso de la librería lib3ds [lib3ds], diseñada específicamente para la manipulación de ficheros 3DS. En la Figura 4.7 se muestra la interfaz de inicialización del entorno con la pestaña entorno seleccionada, que permite cargar y visualizar el contenido del fichero 3DS. Además de la pestaña entorno, la interfaz dispone de las pestañas denominadas emisores, receptores, materiales y simulación.

En las pestañas de emisores y receptores se pueden añadir, eliminar y editar, además de las ubicaciones y orientaciones, los parámetros de los modelos matemáticos utilizados para definir las características de cada uno de los dispositivos emisores y receptores que intervienen en la simulación. La herramienta de simulación, además de permitir modelar el patrón de radiación de los emisores mediante un perfil de radiación Lambertiano generalizado con un índice modal determinado, posibilita definir emisores con un perfil de radiación genérico con simetría axial, es decir, un perfil de radiación en el que se puede especificar la probabilidad de emisión para cada una de las direcciones de radiación posibles. Con respecto a los receptores, además de poder simular receptores basados en un único elemento detector, definiendo su área y FOV, se permite modelar las estructuras más comunes de recepción no formadoras de imagen con detección en diversidad angular. En las Figuras 4.8(a) y (b) se muestran, respectivamente, las instantáneas del aspecto de las pestañas emisores y receptores.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21



(a)



(b)

Figura 4.8. Interfaz de inicialización del entorno. (a) Pestaña emisores. (b) Pestaña receptores.

En la pestaña denominada materiales se pueden añadir, eliminar y editar las características de los diferentes materiales que conforman el entorno de simulación. Para cada identificador o tipo de material se deben incluir los parámetros del modelo de reflexión empleado para aproximar su patrón de

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003		
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
866822	fbse0hw	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/03/2017 02:32:55
En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/03/2017 08:31:53
En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		14/03/2017 13:45:07
En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		14/03/2017 21:06:21
En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		

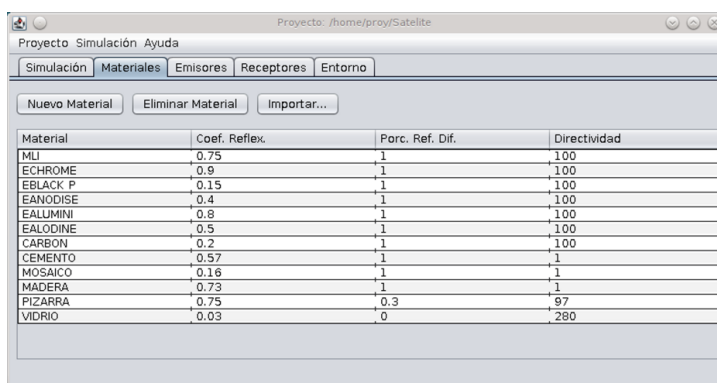


Figura 4.10. Interfaz de inicialización del entorno: pestaña materiales.

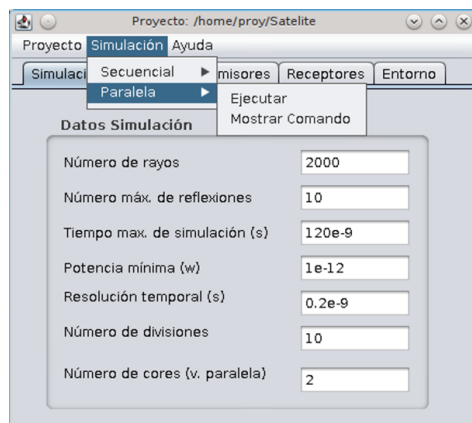


Figura 4.11. Interfaz de inicialización del entorno: pestaña simulación.

reflexión. Como el modelo de reflexión utilizado es el de Phong (ecuación 3.4), para cada tipo de material será necesario especificar el valor del coeficiente de reflexión, el porcentaje de reflexión difusa y la directividad de la componente de reflexión especular.

La última pestaña denominada simulación, permite definir los parámetros generales que intervienen en proceso de simulación: el número de rayos a utilizar, el número máximo de reflexiones, el tiempo máximo de simulación, la resolución temporal y la potencia mínima detectable por cada receptor (Figura 4.10). Los dos parámetros restantes, el número de divisiones y el número de procesadores o núcleos, están relacionados con las mejoras realizadas en este trabajo con la finalidad de reducir el tiempo de simulación.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

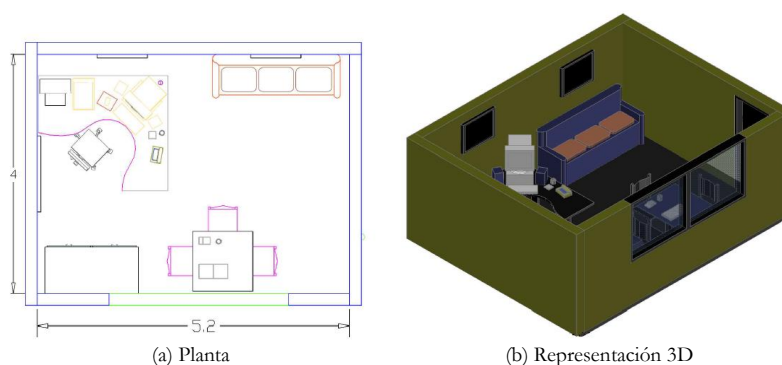


Figura 4.12. Representación gráfica de un despacho diseñado con AutoCAD.

Tabla 4-1. Parámetros de configuración.

Parámetros		Valores		
Recinto:				
Largo (x), m		5,2		
Ancho (y), m		4,0		
Alto (z), m		2,28		
Emisor:				
Posición: (x, y, z), m		(2,6, 2, 2,28)		
Orientación: elevación, acimut		180°, 0°		
Índice modal (n)		1		
Potencia (P _E), W		1		
Receptores:				
Posición R0: (x, y, z), m		(2, 2,2, 0,86)		
Posición R1: (x, y, z), m		(0,2, 3,8, 0,86)		
Orientaciones: elevación, acimut		0°, 0°		
FOV		50°		
Área activa (A _R), cm ²		1		
Parámetros simulación:				
Nº de rayos (N)		500.000		
Nº de reflexiones (k)		10		
Resolución (Δt), ns		0,2		
Tiempo máximo (t _{mic}), ns		120		
Potencia mínima (P _{min}), pW		1		
Materiales:				
	ρ	r_d	m	
Mosaico	0,16	1	---	
Cemento	0,57	1	---	
Madera	0,73	1	---	
Vidrio	0,03	0	280	
Pintura negra	0,04	0	138	
Pizarra	0,75	0,3	97	
Echrome	0,9	1	---	

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

El resto de módulos o funcionalidades de la herramienta de simulación (generación de rayos, propagación del rayo, cálculo de potencias y presentación de resultados), son los encargados de implementar el algoritmo de simulación de Monte Carlo modificado (MMC), el cual ha sido descrito de manera detallada en el Capítulo 3, diseñado y propuesto para determinar la respuesta al impulso del canal óptico no guiado formado por cada pareja emisor y receptor, mediante el uso de técnicas de trazado de rayo y en el método de Monte Carlo.

De forma adicional, la herramienta diseñada incorpora la posibilidad de realizar una simulación en modo traza, generando un fichero de salida que incluye información detallada sobre la propagación de todos los rayos generados durante la simulación, así como las potencias detectadas por los dispositivos receptores. Asimismo, se ha desarrollado una herramienta de visualización en Java 3D, que utiliza dichos ficheros de traza para mostrar gráficamente la propagación de los rayos generados durante el proceso de simulación.

4.2.3. Ejemplo de simulación.

Para mostrar una visión general de las posibilidades de la herramienta de simulación, en este apartado se presenta el estudio de la propagación de la señal infrarroja en el interior del recinto representado en la Figura 4.11. Para realizar el modelaje y diseño en 3D de dicho entorno se ha hecho uso del programa de diseño gráfico AutoCAD, que al igual que el Blender, permite exportar escenas en formato 3DS. Los parámetros que caracterizan la geometría del recinto, las características del emisor y de los receptores, así como los parámetros que definen los patrones de reflexión de las superficies presentes en el recinto, según el modelo de Phong, se muestran en la Tabla 4-1. Como se puede observar, se trata de una situación en la que coexisten un emisor y dos receptores. El emisor, modelado mediante un perfil de radiación Lambertiano generalizado de índice modal igual a 1, se encuentra localizado en el centro del techo del recinto y orientado verticalmente hacia abajo. Los dos receptores, ambos orientados verticalmente hacia arriba, con un campo de visión de 50° y un área física de 1 cm^2 , están situados en dos posiciones sobre la mesa, una más próxima al emisor, la cual se ha identificado como *R0*, y otra más alejada, señalada como *R1*.

En la Figura 4.12 se muestran las respuestas al impulso obtenidas para los dos enlaces o canales infrarrojos establecidos entre el emisor y los dos receptores considerados. En la posición en la que el receptor se sitúa cerca al emisor, *R0*, se puede apreciar la existencia de una fuerte contribución por línea de visión directa entre el emisor y dicho receptor, no existente para el receptor que se encuentra en la posición *R1*, más alejada del emisor. El valor de la potencia debida a la contribución LOS entre el emisor y el receptor *R0* es de $6,9 \mu\text{W}$, mucho mayor que la contribución debida a las múltiples reflexiones que sufre la señal antes de alcanzar a dicho receptor, cuyo máximo es aproximadamente de 5 nW .

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

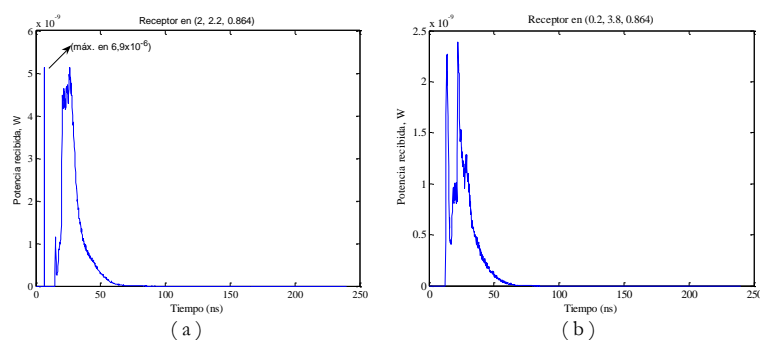


Figura 4.13. Respuestas al impulso de los enlaces IR formado por el emisor y los receptores: (a) R0 y (b) R1.

4.3. Mejoras computacionales de la herramienta de simulación.

Como se comentó en la introducción de este capítulo, con la finalidad de reducir el tiempo de cómputo de la herramienta de simulación, se han llevado a cabo dos optimizaciones. La primera de ellas orientada a mejorar desde un punto de vista computacional la propagación del rayo en el interior del entorno de simulación, y la segunda, consistente en la paralelización del algoritmo de simulación. A continuación se describen cada una de las mejoras realizadas.

4.3.1. Optimización computacional de la propagación del rayo.

Con la idea de mejorar la eficiencia del algoritmo de simulación desde el punto de vista computacional, se ha introducido una optimización sobre el modelo de trazado de rayos original que consiste en dividir el entorno de simulación en un conjunto de subregiones del mismo tamaño. Para ello, el recinto o entorno de simulación se aproxima por un paralelepípedo recto que contiene todos los objetos definidos en el entorno. Uno de los parámetros de simulación que permite especificar la herramienta es el número de subdivisiones ϵ a efectuar en cada eje (Figura 4.10), generándose así un total de ϵ^3 subregiones de igual tamaño.

Por ejemplo, si para simplificar se considera un entorno de dos dimensiones o 2D, el recinto se podría aproximar por un rectángulo. Si se seleccionaran tres divisiones por eje, es decir, se fija $\epsilon = 3$, el rectángulo original quedaría dividido en $\epsilon^2 = 9$ subrectángulos de igual tamaño (Figura 4.13(a)). Estos subrectángulos o rejillas permiten, a la hora de trazar un rayo, considerar únicamente aquellas caras de los objetos y/o superficies que se encuentran en la dirección y sentido de propagación del rayo. En la versión inicial del algoritmo, para propagar el rayo y determinar el punto de colisión, se analizaban todas las superficies o caras de los

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

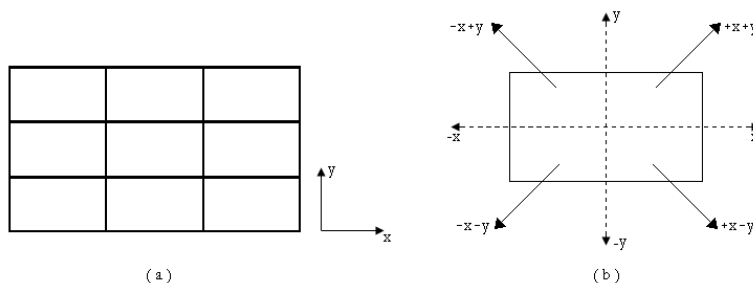


Figura 4.14. (a) Subdivisión del entorno de simulación en subregiones y (b) listas de caras según la subdivisión de los ejes.

Tabla 4-2. Subdivisión en subregiones para un entorno 3D.

x	y	z
+	+	+
+	+	-
+	-	+
+	-	-
-	+	+
-	+	-
-	-	+
-	-	-

objetos integrantes de la escena para comprobar en cuál de ellos se producía finalmente la colisión. Por lo tanto, una vez determinada la subregión en la que se encuentra el rayo y la cara de dicha subregión con la que colisionaría, dicha información se puede utilizar para conocer en todo momento la dirección y sentido de propagación del rayo. Es decir, al propagar un rayo desde una zona con una dirección y sentido determinados, todas aquellas superficies o caras que quedan en dirección y/o sentido contrario al rayo podrían no tenerse en cuenta puesto que el rayo nunca colisionará con ellas. De esta forma, se puede mejorar de manera considerable la eficiencia del algoritmo, puesto que en lugar de comprobar todas las caras de todos los objetos, sólo se comprobarían aquellas que se encuentran en la zona de propagación del rayo.

De nuevo, si para simplificar se supone que disponemos de un entorno 2D, que ha sido subdividido en distintas subregiones, tal y como se mostró en la Figura 4.13(a), para cada una ellas se dispondrá de cuatro listas de caras de objetos, según las distintas direcciones y sentidos posibles de propagación del rayo. En este caso, tal y como se muestra en la Figura 4.13(b), se tendría una lista

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

de caras de objetos que se encuentran en la dirección $+x+y$, otra para la dirección $+x-y$, otra para la $-x-y$, y finalmente, una lista de caras para la dirección $-x+y$. De esta forma, para determinar el punto de colisión, sólo se utilizaría la lista de caras o superficies que coincide con la dirección y sentido de propagación del rayo. En entornos 3D, habría que considerar también la dimensión correspondiente al eje z . En dicho caso, habría que confeccionar ocho listas de caras o superficies de objetos, tal y como se muestra en la Tabla 4-2.

4.3.2. Paralelización del algoritmo de simulación.

La segunda mejora orientada a la reducción del tiempo de simulación ha consistido en la paralelización del algoritmo de simulación de Monte Carlo modificado, que como ya se ha mencionado, está basado en el uso de técnicas de trazado de rayos y en el método de Monte Carlo. En general, el método de Monte Carlo es un método no determinístico o estadístico numérico basado en la generación de un conjunto de números aleatorios para computar un conjunto de resultados asociado a cada uno de ellos. Mediante la unión de cada sub-resultado se llega a la solución final. El cómputo realizado para cada uno de los números aleatorios es independiente al resto de números generados.

La paralelización de los métodos de Monte Carlo suele consistir en la distribución del cómputo asociado a cada número aleatorio entre los distintos procesadores que intervienen en la ejecución. Una posibilidad es distribuir dicho cómputo de forma estática, es decir, repartir el cómputo por igual entre todos los procesadores. Si el esfuerzo computacional asociado a cada número aleatorio varía demasiado, una distribución estática podría hacer que unos procesadores se queden sin trabajo mucho antes que otros. En estos casos habría que recurrir a métodos de balanceo de carga para posibilitar un mejor aprovechamiento de los recursos. Debido a que los métodos de balanceo de carga introducen una cierta carga extra sobre los procesadores, no es aconsejable usarlos en los casos en los que la distribución estática produzca un buen aprovechamiento de los recursos.

En el caso que nos ocupa, cabría pensar que una distribución estática proporcionará un mejor resultado que una distribución balanceada, debido a que la variabilidad del coste computacional asociado a cada rayo no es demasiado elevada. Esta baja variabilidad se debe a la gran cantidad de rayos que se suelen utilizar en una simulación, y al no elevado número máximo de reflexiones que se consideran en relación al gran número de rayos empleados. Como las distribuciones estáticas tienden a distribuir uniformemente entre los distintos procesadores los rayos con similar coste computacional, será poco probable que un procesador tenga que computar una gran cantidad de rayos de alto coste, mientras otros computan los de muy bajo coste. Por ello, se propone como método de paralelización la realización de una distribución estática de los rayos generados para que sean computados por los distintos procesadores. En

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

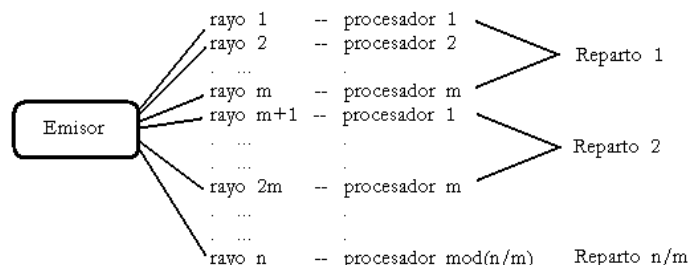


Figura 4.15. Esquema de distribución estática de los rayos.

concreto, para cada emisor que interviene en la simulación, cada procesador se encargará de simular un subconjunto de rayos, tal y como se muestra en la Figura 4.14.

La implementación de la versión paralela ha sido desarrollada con la interfaz de paso de mensajes MPI (*Message Passing Interface*) [Pacheco97, Snir98]. MPI es un estándar para la comunicación entre los nodos que ejecutan un programa en un sistema de memoria distribuida. Este estándar define la sintaxis y la semántica de las funciones contenidas en una biblioteca de paso de mensajes diseñada para ser usada en programas que exploren la existencia de múltiples procesadores.

4.3.3. Evaluación de las mejoras computacionales.

En este apartado se evalúa la reducción del tiempo de simulación derivada de las dos mejoras computacionales introducidas en la herramienta de simulación: la optimización del trazado o propagación de los rayos y la paralelización del algoritmo de simulación. En concreto, se cuantifican las reducciones resultantes de aplicar dichas mejoras al simular la propagación de una señal IR en dos entornos de simulación diferentes, el interior de un satélite artificial y de un aula. En las Figuras 4.15 y 4.20 se representan de manera gráfica dichas escenas 3D de simulación. Para modelar ambas escenas se utilizó el programa de diseño gráfico Blender, no sólo por tratarse de un producto gratuito que ofrece un soporte multiplataforma, sino porque permite exportar escenas en un formato 3DS. Como se ha comentado a lo largo de este capítulo, el fichero debe incluir la definición de la geometría del recinto donde se establece el enlace, los objetos u obstáculos presentes en su interior, los tipos de materiales empleados, así como las posiciones y orientaciones de los emisores y los receptores.

Por último, indicar que las simulaciones en su versión paralelizada se han realizado en un clúster Debian GNU/Linux de 8 nodos bi-procesador Intel Xeon 3,20 GHz con 1GB de RAM y con una red de interconexión Gigabit Ethernet.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

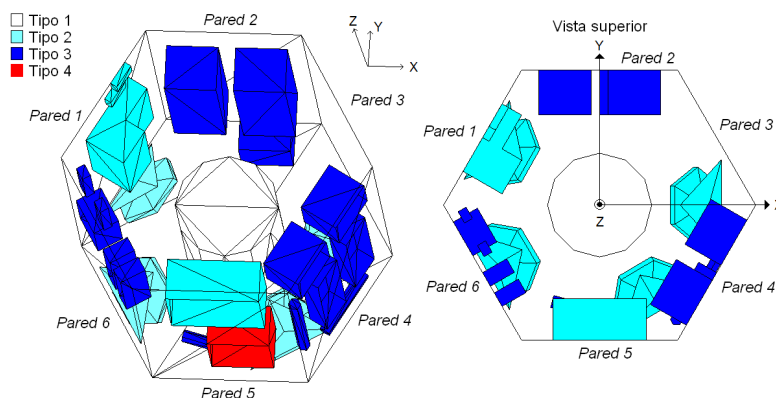


Figura 4.16. Representación gráfica del interior del recinto con forma de prisma hexagonal.

Tabla 4-3. Parámetros de simulación.

Parámetros		Valores		
Emisor:				
	Posición: (x, y, z) , m	(-0,25, 0,14, 0,83)		
	Orientación: elevación, acimut	90°, 330°		
	Índice modal (n)	4,82		
	Potencia emitida (P_E), W	0,21		
Receptor:				
	FOV	90°		
	Área activa (A_R), cm ²	1		
Parámetros simulación:				
	N° de rayos (N)	500.000		
	N° de reflexiones (k)	10		
	Resolución (Δt), ns	0,2		
	Tiempo máximo ($T_{máx}$), ns	120		
	Potencia mínima ($P_{mín}$), pW	1		
Materiales:		ρ	r_d	m
	Tipo 1	0,73	1	---
	Tipo 2	0,82	0,5	230
	Tipo 3	0,52	0,3	250
	Tipo 4	0,04	0	138

La implementación de MPI usada fue MPICH versión 1.2.7, y la del compilador de C++ fue GCC versión 4.1.3.

Entorno de simulación 1: interior de un satélite artificial.

El primer ambiente de interior simulado corresponde al interior de un recinto con forma de prisma hexagonal de 1 m x 1 m, con una gran variedad de objetos u

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

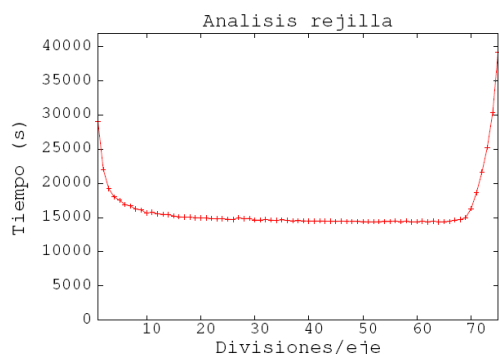


Figura 4.17. Tiempo de simulación en función del número de divisiones por eje o subregiones.

obstáculos en su interior (Figura 4.15). En la Figura 4.7 se muestra dicho entorno de simulación después de que la escena haya sido creada con un programa de diseño 3D, exportada en formato 3DS e importada con la herramienta de simulación.

En la Tabla 4-3 se muestran los parámetros de simulación. Como se puede observar, se ha considerado la coexistencia de un emisor localizado sobre uno de los elementos de la pared 1 y orientado hacia el interior del recinto, con un perfil de radiación Lambertiano con un índice modal de 4,82, y veinticuatro receptores, cada uno de ellos compuesto por un único elemento detector de 1 cm² de área y con un campo de visión de 90°. Además, se ha considerado que el recinto y objetos ubicados en su interior están constituidos por cuatro tipos de materiales diferentes, cuyos patrones de reflexión que se han aproximado mediante el modelo de Phong.

Con la finalidad de evaluar la reducción del tiempo de ejecución derivado de la optimización del trazado o propagación de los rayos, consistente en dividir el entorno de simulación en subregiones cúbicas de igual tamaño, se llevaron a cabo diferentes simulaciones variando el número de divisiones por eje. Si el número de divisiones por eje es $\epsilon = 50$, el recinto quedaría dividido en $\epsilon^3 = 125.000$ subregiones. En la Figura 4.16 se muestra el tiempo de cómputo obtenido en función del número de divisiones establecido por eje.

De los resultados obtenidos se puede apreciar que al introducir el uso de subregiones, $\epsilon > 0$, el tiempo de cómputo disminuye. En concreto, comparando el tiempo de simulación requerido al usar 60 divisiones en cada eje, frente a no considerar la división en subregiones, éste disminuye desde 29.075 a 14.363 segundos, lo que representa una reducción del 50,6%. Sin embargo, también se puede observar que cuando el número de divisiones es superior a 70, el

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

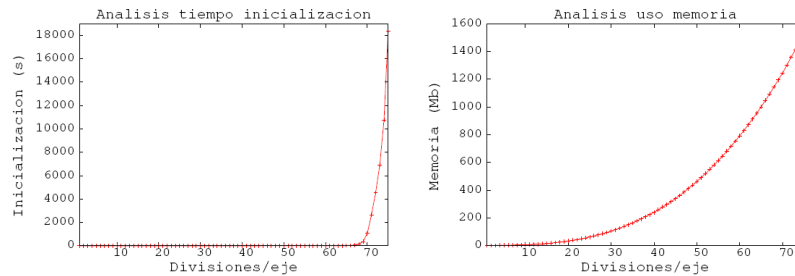


Figura 4.18. Tiempo de inicialización y memoria requeridos en función de las divisiones.

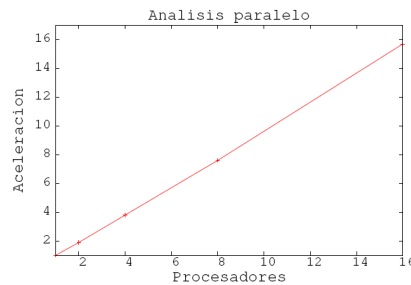


Figura 4.19. Aceleración de la versión paralela frente a la secuencial en función del número de procesadores.

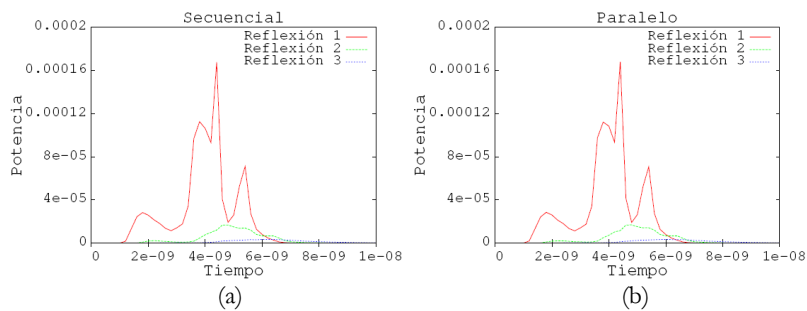


Figura 4.20. Contribución a la respuesta al impulso debida a la 1ª, 2ª y 3ª reflexión, obtenidas con las versiones secuencial (a) y paralela (b), de la herramienta de simulación.

rendimiento de la simulación disminuye. Este hecho se debe a que el incremento del número de divisiones realizadas provoca un incremento en el tiempo requerido de inicialización y en la cantidad de memoria utilizada.

En la Figura 4.17 se muestra cómo varían dichos parámetros al aumentar el número de divisiones por eje. El tiempo de inicialización es muy pequeño en

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

comparación con el tiempo total de cómputo, por lo que tiene un impacto muy pequeño sobre éste. Sin embargo, en los casos en los que se usan más divisiones, la cantidad de memoria requerida es elevada. En estos casos, el programa tiene que hacer uso de memoria de intercambio (*swap*), lo que explica el gran aumento de tiempo de cómputo requerido por dichas ejecuciones.

En la Figura 4.18 se muestra la aceleración computacional obtenida con la herramienta de simulación en su versión paralela frente a su mejor versión secuencial, en función del número de procesadores empleado. La versión secuencial que proporcionó el menor tiempo de cómputo correspondió al uso de 60 divisiones por eje. Sin embargo, como cada nodo empleado en el estudio de la paralelización es de tipo bi-procesador, es decir, en cada nodo se ejecutarán dos procesos compartiendo la memoria disponible, la elección de 60 divisiones requeriría el uso de memoria de intercambio, dejando de ser la mejor opción. Por este motivo, el número de divisiones se redujo hasta 45, evitando así el uso de memoria de intercambio. De los resultados mostrados, se puede apreciar que las aceleraciones obtenidas presentan un comportamiento prácticamente lineal frente al número de procesadores utilizados, verificando así el supuesto inicial de que la distribución estática de los rayos entre los procesadores es suficiente para conseguir un buen aprovechamiento de los recursos de cómputo disponibles.

En la Figura 4.19 se muestran las contribuciones a las respuestas al impulso debida a la señal que alcanza a uno de los receptores tras sufrir una, dos y tres reflexiones, obtenidas con la herramienta de simulación en sus versiones paralela y secuencial. Por simplicidad, se muestran sólo las contribuciones de potencia asociada con las tres primeras reflexiones. Como se puede observar, ambas versiones proporcionan el mismo resultado, exceptuando pequeñas variaciones debidas al comportamiento no determinístico del algoritmo de simulación.

Entorno de simulación 2: interior de un aula.

El segundo ambiente de interior simulado corresponde al interior de un aula de la Sección de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad de La Laguna (Figura 4.20). En la Tabla 4-4 se recogen los parámetros utilizados en las simulaciones.

Como se puede observar, en este caso se ha considerado un emisor con un perfil de radiación Lambertiano con $n = 20$, y un receptor sectorizado compuesto por dieciséis sectores. Además, se ha considerado que las superficies del recinto están constituidas por cinco tipos de materiales diferentes, cuyos patrones de reflexión se han aproximado mediante el modelo de Phong.

En la Figura 4.21 se muestra el tiempo de cómputo obtenido en función del número de divisiones establecido por eje. Al igual que para el entorno de simulación estudiado con anterioridad, al introducir el uso de subregiones el tiempo de cómputo disminuye. En concreto, comparando el tiempo de

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

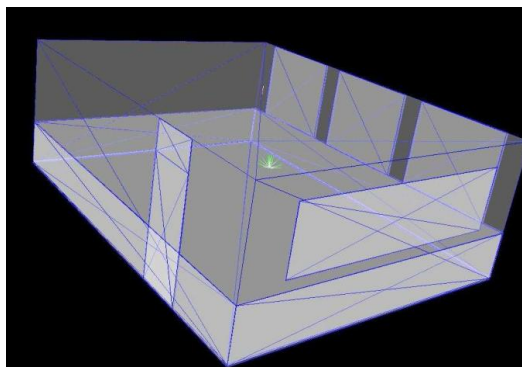


Figura 4.21. Representación gráfica del aula 18 de la Sección de Física de la ULL.

Tabla 4-4. Parámetros de simulación.

Parámetros		Valores		
Recinto:	Dimensiones: (x, y, z) , m	(6, 7,8, 2,75)		
Emisor:	Posición: (x, y, z) , m	(3, 3,9, 2,75)		
	Orientación: elevación, acimut	180°, 0°		
	Índice modal (n)	20		
	Potencia emitida (P_{Ei}), W	1		
Receptor sectorizado:	Posición: (x, y, z) , m	(4, 3,9, 1)		
	Radio, cm	0,2		
	N° coronas, N° sectores	3, 16		
Parámetros simulación:	N° de rayos (N)	500.000		
	N° de reflexiones (k)	10		
	Resolución (Δt), ns	0,2		
	Tiempo máximo ($T_{máx}$), ns	120		
	Potencia mínima ($P_{mín}$), pW	1		
Materiales:		ρ	rd	m
	Madera	0,63	0,6	3
	Madera barnizada	0,75	0,3	97
	Cemento	0,40	1	---
	Cerámica	0,16	0,7	20
	Cristal	0,03	0	280

simulación requerido al usar 47 divisiones por eje, frente a no considerar subregiones, éste disminuye desde 1.003 a 652 segundos, lo que representa una reducción del 35%.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación: fbsse0hw	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21	
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55	
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53	
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07	
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21	

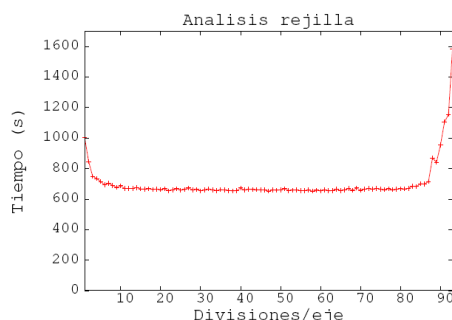


Figura 4.22. Tiempo de simulación en función del número de divisiones por eje o subregiones.

Al igual que en el estudio del entorno anterior, se comprueba que existe un número de divisiones a partir del cual el tiempo de cómputo empieza a aumentar, llegando a superar al tiempo de simulación que se obtiene sin llevar a cabo la división del recinto en subregiones.

La Figura 4.22 muestra la variación del tiempo de inicialización y los requerimientos de memoria con el aumento del número de divisiones por eje. Se puede apreciar que el tiempo de inicialización es muy pequeño en comparación con el tiempo total de cómputo, teniendo un impacto muy pequeño sobre éste. Sin embargo, cuando se requiere una cantidad de memoria similar a la memoria RAM disponible, el tiempo de cómputo aumenta de forma notable. Este aumento, no se debe a un aumento de la cantidad de cómputo asociada, sino a la necesidad de uso de memoria de intercambio, mucho más lenta que la memoria RAM.

La aceleración computacional obtenida con la herramienta de simulación en su versión paralela frente a su mejor versión secuencial, en función del número de procesadores empleado, se representa en la Figura 4.23. En este caso, la mejor versión secuencial en términos del tiempo de cómputo se obtuvo al considerar 47 divisiones por eje.

Los resultados obtenidos permiten corroborar que las aceleraciones que se consiguen suponen una reducción del tiempo de simulación prácticamente proporcional al número de procesadores utilizados, verificando nuevamente que la distribución estática de los rayos entre los procesadores es suficiente para conseguir un buen aprovechamiento de los recursos de cómputo disponibles.

Finalmente, la Figura 4.24 muestra las repuestas al impulso para dos sectores del receptor sectorizado obtenidas con las versiones secuencial y paralela de la herramienta de simulación. Como se puede observar, de nuevo ambas versiones

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

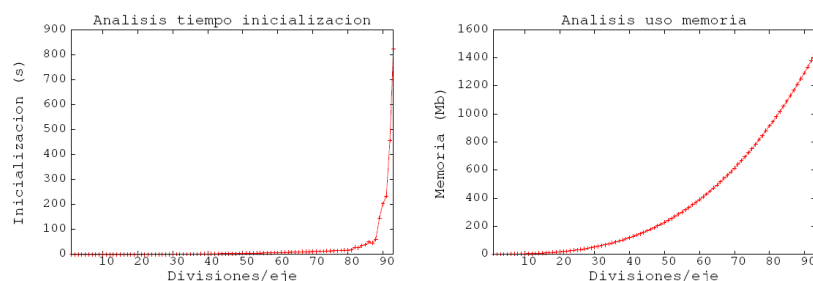


Figura 4.23. Tiempo de inicialización y memoria requeridos en función de las divisiones.

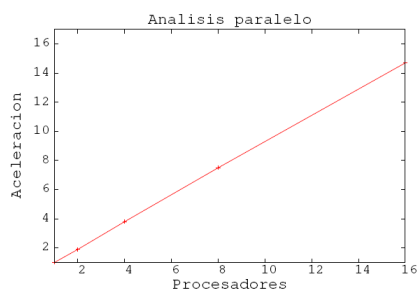


Figura 4.24. Aceleración de la versión paralela frente a la secuencial en función del número de procesadores.

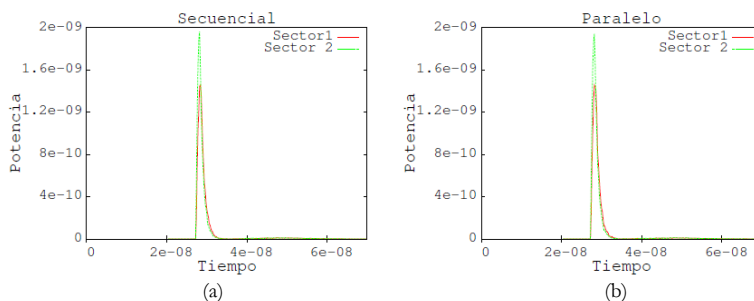


Figura 4.25. Respuestas al impulso para dos sectores del receptor sectorizado obtenidas con la versión secuencial (a) y paralela (b), de la herramienta de simulación.

proporcionan el mismo resultado, exceptuando pequeñas variaciones debidas al comportamiento no determinístico del algoritmo de simulación.

Con los resultados obtenidos se puede concluir que las dos mejoras computacionales introducidas en la herramienta de simulación permiten reducir de manera considerable el tiempo de cómputo. En concreto, la optimización del

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/03/2017 02:32:55
	En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/03/2017 08:31:53
	En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	14/03/2017 13:45:07
	En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	14/03/2017 21:06:21
	En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	

trazado o propagación del rayo basada en la división del entorno de simulación en subregiones, produjo una mejora del 35% al estudiar la propagación de la señal IR en el interior del aula y del 50,6% en el caso del recinto que con forma de prisma hexagonal busca emular el interior de un satélite artificial. Además, el número de divisiones por eje a utilizar debe ser el mayor valor que no sature el nodo en cuanto a cantidad de memoria requerida.

En cuanto a la mejora computacional basada en la paralelización de la herramienta de simulación, para ambos escenarios o entornos de simulación se ha podido constatar que llevando a cabo una distribución estática de los rayos entre los procesadores disponibles se consigue alcanzar una aceleración del cómputo prácticamente lineal al número de procesadores utilizados, verificando el supuesto inicial de que no es necesario recurrir a métodos de balanceo de carga para posibilitar un mejor aprovechamiento de los recursos de cómputo.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: <http://sede.ull.es/validacion>

Identificador del documento: 866822 Código de verificación: fbsse0hw

Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

Capítulo 5

Modelo de receptor sectorizado aplicable a algoritmos de trazado de rayos

Con el fin de obtener una mayor eficiencia en potencia, minimizar el efecto de la dispersión por multipropagación, y reducir el efecto debido al ruido generado por las fuentes de iluminación ambiental, se pueden utilizar estructuras de receptores que emplean detección en diversidad angular. En general, un receptor en diversidad angular utiliza múltiples elementos detectores orientados hacia diferentes direcciones. Como se comentó en el capítulo 2, básicamente existen tres formas de conseguir detección en diversidad angular: mediante un receptor basado en múltiples fotodiodos orientados hacia diferentes direcciones, mediante un receptor basado en una matriz de fotodetectores situados en el plano focal de una lente formadora de imagen, o a través de un receptor sectorizado, es decir, un conjunto de fotodiodos dispuestos de forma semiesférica.

En este capítulo se presenta un modelo matemático aplicable a algoritmos de simulación basados en la técnica de trazado de rayos [Mendoza04, Mendoza05, Mendoza07], como el algoritmo de Monte Carlo modificado o MMC, que posibilita simular el área efectiva de detección de un receptor sectorizado en diversidad angular. Dicha estructura de recepción en diversidad angular fue propuesta por R.T. Valadas [Valadas94], poniendo de manifiesto su capacidad de mejorar las prestaciones de aquellos enlaces ópticos no guiados de interior caracterizados por emplear este tipo de receptores.

Además de presentar y validar el modelo del receptor sectorizado propuesto, se realiza un estudio de este tipo de receptores basado en la utilización de la herramienta de simulación descrita con anterioridad en el capítulo 4. En dicho estudio se toma como objetivo la búsqueda de aquella estructura de receptor sectorizado que mejores prestaciones presenta respecto a los principales parámetros que caracterizan el canal infrarrojo en ambientes de interior, concretamente, la dispersión de retardo y las pérdidas ópticas debidas a la propagación.

5.1. Modelo de receptor sectorizado.

En este apartado se presenta la estructura de un receptor sectorizado que emplea detección en diversidad angular y se propone el modelo matemático de su

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

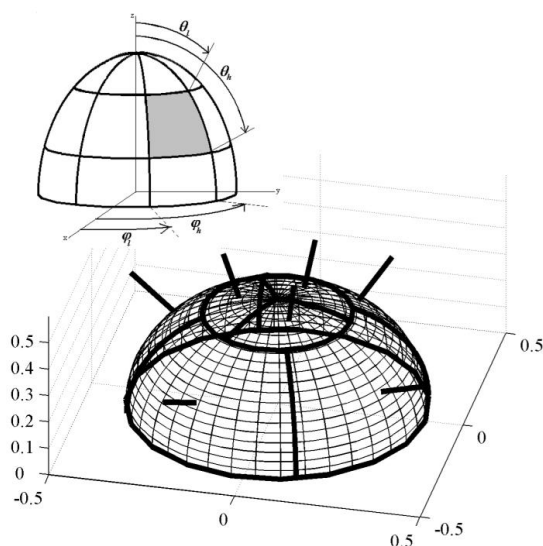


Figura 5.1. Definición de los límites angulares en elevación y acimut, y estructura de receptor sectorizado de dos coronas y siete sectores: $\Psi = \{(3, 0^\circ, 0^\circ, 30^\circ), (4, 20^\circ, 30^\circ, 90^\circ)\}$.

área efectiva de detección que permite simular aquellos enlaces caracterizados por el uso de este tipo de receptores. Un receptor sectorizado está formado por un conjunto de fotodetectores dispuestos de forma semiesférica [Valadas94, Lomba95], que al emplear detección en diversidad angular permite minimizar los efectos de la dispersión temporal debida a la multipropagación, las pérdidas ópticas por propagación y el ruido debido a la iluminación ambiental.

En la Figura 5.1 se muestra la estructura de un receptor sectorizado compuesto por dos coronas y siete sectores. En dicha estructura, un conjunto de líneas horizontales (paralelos) y verticales (meridianos) equiespaciadas definen los límites de cada uno de los sectores. Se entiende como corona el espacio del receptor comprendido entre dos paralelos consecutivos, y como sector, la superficie de la corona que queda confinada entre dos meridianos contiguos. Teniendo esto en cuenta, todos los sectores que pertenecen a la misma corona se caracterizan por tener los mismos límites angulares en elevación e igual apertura acimutal. En resumen, la estructura del receptor sectorizado queda completamente especificada por un conjunto de parámetros Ψ [Valadas94], donde se especifica, para cada una de las N_C coronas o subconjuntos, cuatro parámetros que indican: el número de sectores en el que se divide la corona, N_S , el ángulo de *offset* en acimut que indica el ángulo acimutal a partir del cual comienza su primer sector, ε , y los límites angulares en elevación de la corona, θ_l y

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

θ_b . La estructura del receptor sectorizado mostrado en la Figura 5.1 estaría caracterizado por $\Psi = \{(3, 0^\circ, 0^\circ, 30^\circ), (4, 20^\circ, 30^\circ, 90^\circ)\}$. La primera corona contiene tres sectores con una apertura vertical de $\theta_b - \theta_l = 30^\circ$ y una apertura acimutal de $\varphi_b - \varphi_l = 120^\circ$. La segunda corona, cuyos sectores presentan una orientación próxima a la horizontal, tienen una apertura vertical y horizontal de 60° y 90° , respectivamente, con su primer sector desplazado con un *offset* de 20° en acimut.

Para caracterizar cada uno de los sectores que conforman el receptor, es necesario especificar su posición, orientación, área efectiva de detección, y campos de visión vertical y horizontal. Teniendo en cuenta que la región que define a cada sector queda descrita por sus dos ángulos límites en elevación θ_l y θ_b , y sus dos ángulos límites en acimut φ_l y φ_b , donde $\theta_l \leq \theta_b$ y $\varphi_l \leq \varphi_b$ (ver Figura 5.1), la orientación de cada sector, definida en términos del ángulo de elevación y acimut (θ_s, φ_s) relativos al sistema de coordenadas del receptor (x_R, y_R, z_R) , queda definida por:

$$\theta_s = \frac{\theta_l + \theta_b}{2}, \quad \varphi_s = \frac{\varphi_l + \varphi_b}{2} \quad (5.1)$$

En el caso de que el receptor posea una corona polar o superior compuesta por un único sector orientado verticalmente hacia arriba, esto es $\theta_s = 0^\circ$, los límites en elevación serían $\theta_l = 0$ y cualquier $\theta_b \leq \pi/2$, con $\varphi_b - \varphi_l = 2\pi$.

Por otro lado, los ángulos límites en elevación y acimut están relacionados con los campos de visión horizontal (FOV_H) y vertical (FOV_V) de cada sector, mediante las siguientes expresiones:

$$FOV_H^s = \frac{\theta_l - \theta_b}{2}, \quad FOV_V^s = \frac{\varphi_l - \varphi_b}{2} \quad (5.2)$$

Al igual que para un receptor basado en un único elemento detector, el modelo matemático que determina el área efectiva de detección de cada sector [Mendoza07], se puede describir como:

$$A_{ef}^s(\psi) = \begin{cases} A_s \cdot \cos(\psi) & 0 \leq \psi \leq \pi/2 \\ 0 & \psi > \pi/2 \end{cases} \quad (5.3)$$

donde ψ es el ángulo que forma el haz incidente con respecto a la orientación del sector y A_s representa el área física activa del sector, la cual se puede expresar como:

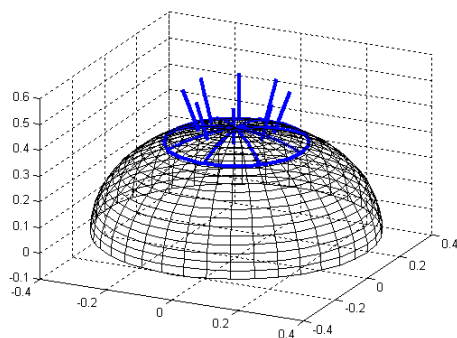
$$A_s = r^2 \cdot (\varphi_b - \varphi_l) \cdot (\cos \theta_l - \cos \theta_b) \quad (5.4)$$

donde r representa el radio de la semiesfera del receptor.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

Tabla 5-1. Parámetros de las simulaciones.

Parámetros	Valores
Recinto:	
Largo (x), m	8
Ancho (y), m	8
Alto (z), m	4
ρ (Norte)	0,7
ρ (Sur)	0,7
ρ (Este)	0,7
ρ (Oeste)	0,7
ρ (Techo)	0,7
ρ (Suelo)	0,7
Emisor:	
Posición: (x, y, z), m	(4, 4, 1)
Elevación	0°
Acimut	0°
Índice modal (n)	1
Receptor de referencia:	
Elevación	0°
Acimut	0°
FOV	90°
Área, cm ²	1
Parámetros simulación:	
N° de rayos (N)	500.000
N° de reflexiones (k)	5
Resolución (Δt), ns	0,2
Tiempo máximo ($t_{máx}$), ns	120
Potencia mínima ($P_{mín}$), pW	1

Figura 5.2. Receptor sectorizado con una única corona: $\Psi = \{(8, 0^\circ, 0^\circ, 30^\circ)\}$.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

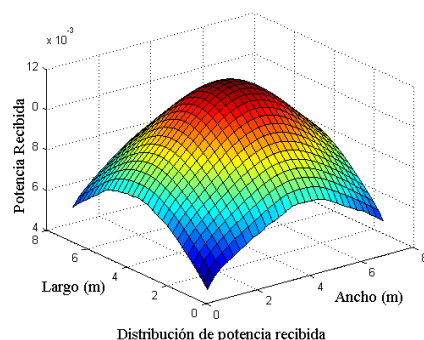


Figura 5.3. Distribución espacial de potencia óptica total recibida en el interior de recinto utilizado en las simulaciones.

Al igual que en la propuesta realizada por R.T. Valadas, en este modelo se asume que no hay solapamiento entre los campos de visión de los sectores que conforman el receptor.

5.2. Validación del modelo de receptor sectorizado.

Para validar que la adaptación del modelo propuesto para el receptor sectorizado al algoritmo de Monte Carlo modificado se ha realizado correctamente, se han determinado las respuestas al impulso del canal de un enlace IR establecido en el interior de un recinto con forma de prisma cuadrangular considerando dos configuraciones diferentes. En una de ellas se emplea un receptor basado con un único elemento detector con un FOV de 90° (receptor de referencia), y en la otra, un receptor sectorizado. Estas dos configuraciones coinciden con las propuestas por C. R. Lomba [Lomba95], en las que haciendo uso del algoritmo iterativo de J. R. Barry, muestra las mejoras debidas a la utilización de un receptor sectorizado frente a uno basado en un único elemento detector. En la Tabla 5-1 se muestran los parámetros de simulación de ambas configuraciones o enlaces.

En la configuración caracterizada por emplear un receptor sectorizado, se utiliza un receptor constituido por una única corona con ocho sectores equiespaciados en acimut (Figura 5.2). Cada sector presenta una apertura horizontal y vertical de $\varphi_b - \varphi_l = 45^\circ$ y $\theta_b - \theta_l = 30^\circ$ ($\theta_l = 0^\circ$ y $\theta_b = 30^\circ$), respectivamente. En ambas configuraciones se ha considerado que el emisor presenta un perfil de radiación Lambertiano con índice modal $n = 1$, que está situado en el centro del recinto, a un metro sobre el suelo, y orientado verticalmente hacia el techo. En lo que se refiere al receptor, se ha localizado en la zona donde se reciben los valores máximos de potencia y, al igual que el emisor, también se encuentra a un metro de altura sobre el suelo, $z_R = 1$.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

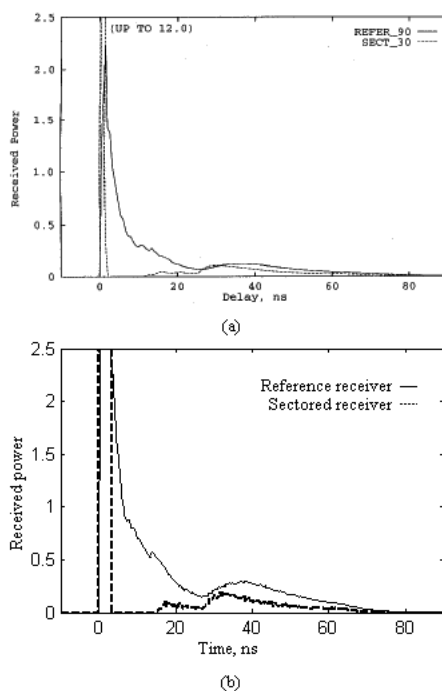


Figura 5.4. Respuestas impulsivas obtenidas para las dos configuraciones. (a) Resultados obtenidos por C. R. Lomba [Lomba95]. (b) Con el modelo y algoritmo MMC.

Para determinar la posición del receptor, es decir, la zona en la que se reciben valores elevados de potencia dentro del recinto, se consideraron múltiples posiciones del receptor distribuidas uniformemente a lo largo de todo el interior y se determinó la potencia óptica total recibida para cada una de ellas. El número de rayos utilizados para calcular el nivel de potencia recibida en cada una de las posiciones del receptor simuladas fue de 500.000. En la Figura 5.3 se muestra como se distribuye de manera espacial la potencia óptica total recibida en el interior del recinto considerado en las simulaciones. Como se puede observar, el centro y las esquinas son las zonas donde se reciben los valores máximos y mínimos de potencia, respectivamente. En las simulaciones se ha utilizado el receptor de referencia con un área física de 1 cm^2 , orientado verticalmente hacia el techo y con un FOV de 90° .

En las Figura 5.4(a) y (b) se muestran las respuestas al impulso obtenidas en función del tipo de receptor utilizado: receptor sectorizado y de referencia. La línea discontinua corresponde a la respuesta al impulso resultante de utilizar el receptor sectorizado y la respuesta representada con una línea continua es la

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

obtenida con el receptor de referencia. La Figura 5.4(a) muestra los resultados obtenidos por C. R. Lomba [Lomba95], haciendo uso del método iterativo de J. R. Barry; y la Figura 5.4(b), los resultados obtenidos mediante la utilización del algoritmo de Monte Carlo modificado o MMC. Como se puede observar existe una gran similitud entre los resultados obtenidos a través de ambos métodos de simulación, lo cual demuestra la validez del modelo propuesto para el receptor sectorizado, aplicable a algoritmos de simulación basado en técnicas de trazado de rayos.

5.3. Influencia de los parámetros de diseño de un receptor sectorizado sobre las características del canal.

Obtener la estructura de un receptor sectorizado consiste básicamente en establecer cómo se distribuyen sus sectores sobre la superficie semiesférica, determinando para cada uno de ellos su orientación y tamaño, o alternativamente al tamaño, sus campos de visión vertical y horizontal (ecuación 5.2). Por lo tanto, en este apartado se estudian mediante simulación el efecto del FOV_v , FOV_H y de la orientación de un sector que actúa como detector IR, sobre las características del canal IR. Dicho estudio ha permitido determinar los parámetros que definen la estructura óptima del receptor sectorizado que proporciona las mejores prestaciones medidas en términos de los principales parámetros que caracterizan el canal IR en interiores: la dispersión de retardo (*rms spread delay*, τ_{rms}), y las pérdidas ópticas por propagación (*Path Loss*, PL).

Como se desea encontrar una estructura que sea óptima independiente de la posición del receptor dentro del recinto, para cada una de las posiciones es necesario estudiar la dependencia de las características del canal en función de todos los posibles FOV_v , FOV_H y orientaciones que pueden tener los sectores que cubren la semiesfera de un receptor sectorizado. Para ello se realizaron múltiples simulaciones con el objetivo de estudiar la propagación de la señal IR en el interior del recinto cuya representación gráfica se muestra en la Figura 5.5. Para todas las simulaciones realizadas, se situó el emisor en el centro de la habitación orientado verticalmente hacia el techo, y se desplazó el receptor formando círculos concéntricos respecto a la posición del emisor, Figura 5.5(b). Sobre cada uno de los círculos, de radios 0,5, 1,5 y 2,5 m, se consideraron cuatro posiciones distribuidas uniformemente. Para cada una de las posiciones se consideraron las diferentes orientaciones que puede tener un sector, que forma parte de la semiesfera de un receptor sectorizado, actuando como detector. Dichas orientaciones se obtuvieron variando el ángulo de elevación, θ_s , desde 2° hasta 83° en incrementos de 9° , y el ángulo de acimut, ϕ_s , desde 0° hasta 360° , en incrementos de 36° . Por último, para cada posición y orientación, se determinó la respuesta al impulso del canal combinando diferentes FOV_v y FOV_H . Los valores empleados han sido de 2° , 10° , 15° , 22° y 45° , para el campo de visión vertical, y

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

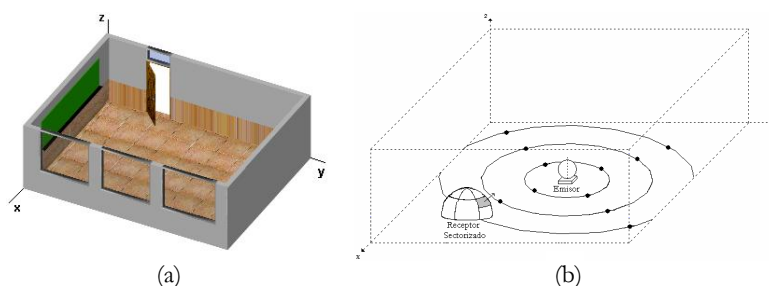


Figura 5.5. (a) Representación gráfica del aula 18 de la Sección de Física. (b) Plan de medidas para las simulaciones realizadas.

Tabla 5-2. Parámetros comunes a todas las simulaciones.

Parámetros		Valores		
Recinto:				
Ancho (x), m		6		
Largo (y), m		7,8		
Alto (z), m		2,75		
Emisor:				
Posición {x, y, z}		(3, 3,9, 1)		
Orientación: elevación, acimut		0°, 0°		
Índice modal (n)		1		
Potencia (P _e), W		1		
Receptor sectorizado:				
Radio (r), cm		0,2		
Posición: (x, y, z), m		-, -, 1		
Responsividad (R), A/W		0,6		
Parámetros simulación:				
Nº de rayos (N)		100000		
Nº de reflexiones (k)		5		
Resolución (Δt), ns		0,2		
Tiempo máximo (T _{máx}), ns		120		
Potencia mínima (P _{mín}), pW		1		
Materiales:		ρ	r_d	m
Cerámica		0,16	1	---
Cemento		0,57	1	---
Madera		0,73	1	---
Madera barnizada		0,75	0.3	97
Cristal		0,03	0	280

de 5°, 15°, 22° y 45°, para el horizontal. El resto de parámetros utilizados en las simulaciones se muestran en la Tabla 5-2. Para poder trabajar con esta gran cantidad de datos se ha optado por estudiar el problema de manera estadística y se ha dividido el análisis en dos estudios, uno en elevación y otro en acimut.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

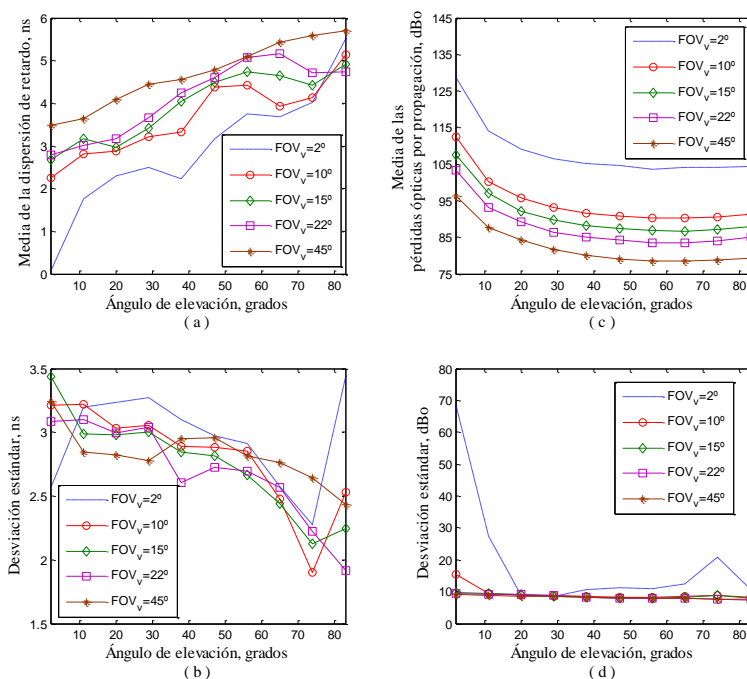


Figura 5.6. Estudio en elevación para cada FOV_V. (a) Media y (b) desviación estándar de la dispersión de retardo. (c) Media y (d) desviación estándar de las pérdidas por propagación.

Con respecto al estudio en elevación, en las Figura 5.6(a) y (b) se representan, respectivamente, la media y la desviación estándar de la dispersión de retardo en función del ángulo de elevación y para los diferentes FOV_V establecidos, mientras que en las Figura 5.6(c) y (d), se hace lo propio para la media y desviación estándar de las pérdidas ópticas por propagación. Estas curvas se han confeccionado después de analizar para cada una de las posiciones en el interior del recinto, todas las orientaciones en acimut y FOV_H considerados.

De los resultados obtenidos se puede observar que la dispersión de retardo presenta mayores fluctuaciones a medida que el campo de visión vertical disminuye. En otras palabras, aquellos sectores con pequeños FOV_V son más sensibles a cambios en el ángulo de elevación. Por ejemplo, para un FOV_V = 45°, la dispersión de retardo presenta una variación de 2,2 ns, siendo su valor máximo de 5,6 ns y mínimo de 3,4 ns; sin embargo, para un FOV_V = 2°, el cambio es aproximadamente de 5,5 ns, con un valor máximo de 5,5 ns y un mínimo de 0,08 ns. No ocurre lo mismo con las pérdidas ópticas por propagación, donde las variaciones son más suaves frente a cambios de elevación, independientemente

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
866822	fbse0hw	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

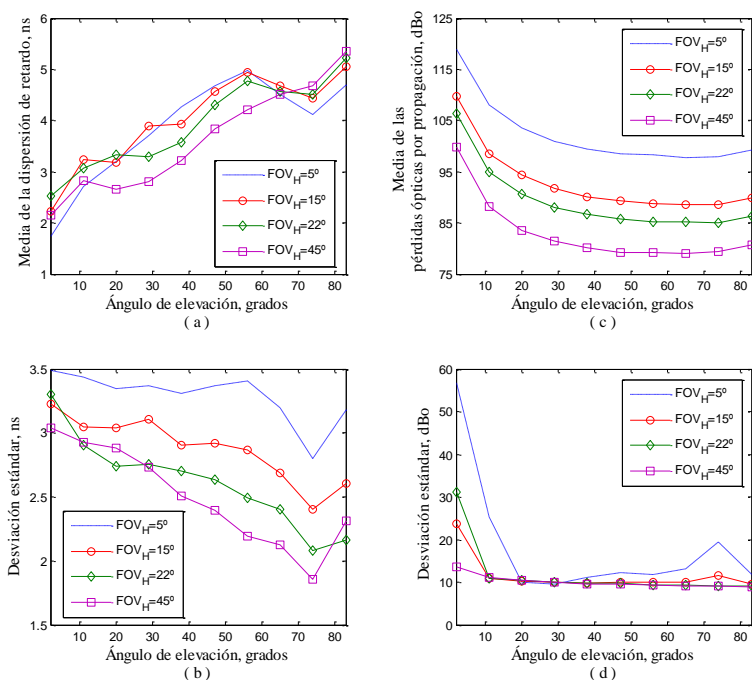


Figura 5.7. Estudio en elevación para cada FOV_H . (a) Media y (b) desviación estándar de la dispersión de retardo. (c) Media y (d) desviación estándar de las pérdidas por propagación.

del FOV_V . Se puede observar que hay un ligero aumento de las pérdidas cuando el sector está orientado hacia el techo y que los valores de las pérdidas disminuyen a medida que aumenta el FOV_V del sector. Sin embargo, esta reducción no es lineal, por ejemplo, si se observa la caída en las pérdidas por propagación debidas a aumentar el FOV_V desde 15° hasta 22° es mucho más pequeña que las debidas al cambio desde 2° hasta 10°.

Un estudio detallado de los resultados permite establecer que los sectores con ángulos de elevación iguales o mayores a 74°, esto es, próximos a la base de la semiesfera, deberían presentar valores de FOV_V en torno a 22°. Mientras que para el resto de las elevaciones, un FOV_V comprendido entre 10° y 15° es el que presenta un mayor compromiso entre la dispersión de retardo y las pérdidas por propagación.

En las Figura 5.7(a) y (b) se muestran, respectivamente, la media y la desviación estándar de la dispersión del retardo en función del ángulo de elevación para los diferentes FOV_H establecidos, mientras que en las Figura 5.7(c)

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

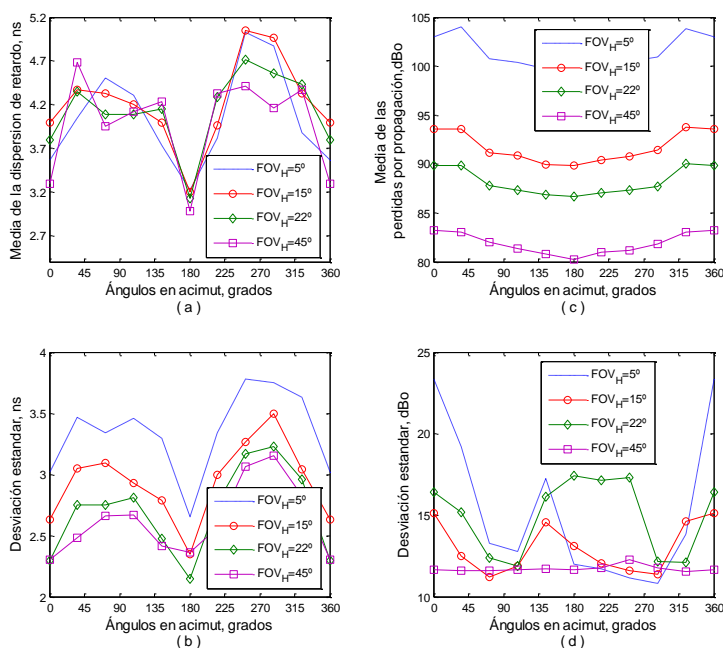


Figura 5.8. Estudio en acimut para cada FOV_H . (a) Media y (b) desviación estándar de la dispersión de retardo. (c) Media y (d) desviación estándar de las pérdidas por propagación.

y (d), se hace lo propio para la media y desviación estándar de las pérdidas ópticas por propagación. Estas curvas se han confeccionado después de analizar para cada una de las posiciones en el interior del recinto, todas las orientaciones en acimut y FOV_V considerados. Como se puede observar, se trata de un estudio similar al anterior pero en función del campo de visión horizontal.

Los resultados alcanzados permiten establecer, primero, tanto para ángulos de elevación menores que 15° , como para mayores de 65° , sectores con un FOV_H pequeño puesto que presentan los valores más bajos de dispersión. Segundo, para el resto de los ángulos en elevación, la dispersión por retardo disminuye cuando el FOV_H aumenta. Y tercero, sectores con amplios FOV_H reducen las pérdidas ópticas por propagación. Basándonos en estas consideraciones, los sectores con ángulos de elevación superiores a 65° deberían presentar un FOV_H con valores comprendidos entre 15° y 22° , mientras que para el resto de las elevaciones, los sectores con 45° de FOV_H son los que presentan mínimos tanto en la dispersión como en las pérdidas por propagación.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

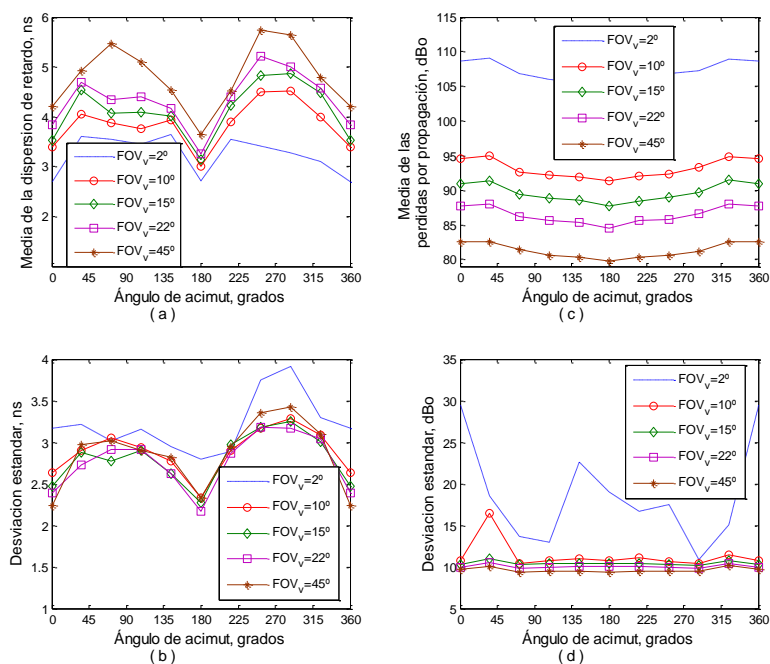


Figura 5.9. Estudio en acimut para cada FOV_v . (a) Media y (b) desviación estándar de la dispersión de retardo. (c) Media y (d) desviación estándar de las pérdidas por propagación.

El mismo proceso que se ha realizado en elevación también se ha llevado a cabo en acimut. Las Figura 5.8(a) y (b) representan, respectivamente, la media y la desviación estándar de la dispersión de retardo en función del ángulo de acimut para los diferentes FOV_H establecidos, mientras que en las Figura 5.8(c) y (d), se representan la media y desviación estándar de las pérdidas ópticas por propagación. De los resultados obtenidos, se puede observar que un sector con un $FOV_H = 45^\circ$ presenta los valores más bajos tanto de dispersión de retardo como de pérdidas por propagación. Del mismo modo, en las Figura 5.9 se muestran los valores obtenidos para los mismos parámetros pero respecto al FOV_v . En este caso, son los sectores con $FOV_v = 15^\circ$ los que presentan un mejor resultado en ambos parámetros simultáneamente.

En la Tabla 5-3 se resumen los resultados obtenidos del estudio en elevación y en acimut. Según los mismos, el receptor sectorizado se debe diseñar de tal manera que los sectores próximos a la dirección vertical, o con pequeños ángulos de elevación, presenten estrechos FOV_v y amplios FOV_H , mientras que aquellos sectores con ángulos de elevación superiores a 75° , deberían tener un campo de

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

Tabla 5-3. Campo de visión vertical y horizontal y número de sectores de cada corona como función de su ángulo de elevación.

Elevaciones	FOV _V	Apertura vertical	FOV _H	Apertura horizontal	Nº de sectores
Pequeñas	(8°- 16°)	(16°- 32°)	45°	90°	4
Intermedias	(10°- 15°)	(20°- 30°)	45°	90°	4
Grandes (≥75°)	22°	44°	22°	45°	8

visión horizontal y vertical de 22°, es decir, aperturas de 44°. Para el resto de ángulos de elevación, los mejores resultados se obtienen para sectores con un FOV_H de 45° y un FOV_V comprendido entre 10° y 15°. En definitiva, la estructura del receptor sectorizado con forma semiesférica que en diversidad angular presenta las mejores prestaciones con respecto a los dos principales parámetros del canal IR en interiores, deberá tener un perfil en elevación compuesto por tres coronas con aperturas verticales diferentes. La corona próxima a la vertical del receptor y la intermedia, dispondrán cada una de cuatro sectores distribuidos uniformemente en acimut sobre sus superficies (FOV_H = 45°), mientras que la corona con un ángulo de elevación cercano a la horizontal requerirá de ocho sectores, también repartidos uniformemente sobre su superficie (FOV_H = 22°).

5.4. Consideraciones sobre la estructura de un receptor sectorizado con diversidad angular.

Del estudio realizado en el apartado anterior se han podido establecer diversas condiciones sobre cómo distribuir los sectores sobre la semiesfera de un receptor sectorizado para que proporcione las mejores prestaciones medidas en términos de los principales parámetros que caracterizan el canal IR en ambientes de interior.

En este apartado, se comparan las prestaciones de varias configuraciones de receptor cuyos parámetros de diseño se encuentran dentro de las condiciones o limitaciones obtenidas, con el fin de establecer la estructura del receptor sectorizado que optimiza las características del canal, es decir, minimiza la dispersión de retardo y las pérdidas ópticas por propagación. En la Tabla 5-4 se muestran las estructuras Ψ_i propuestas. Se trata de cuatro estructuras con dieciséis sectores cada una, distribuidos en tres coronas con diferentes aperturas. Tanto la corona 1, con una elevación próxima a la vertical, como la corona 2 (corona intermedia), cuentan con cuatro sectores de igual apertura horizontal y distintas aperturas verticales. La corona 3, próxima base de la semiesfera, contiene ocho sectores de igual apertura horizontal.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

Tabla 5-4. Estructuras que definen al receptor sectorizado utilizado en las simulaciones.

Receptor Sectorizado	Corona = $(N_s, \varepsilon, \theta_i, \theta_f)$		
	Corona 1	Corona 2	Corona 3
Ψ_1	(4, 0°, 0°, 16°)	(4, 20°, 16°, 46°)	(8, 0°, 46°, 90°)
Ψ_2	(4, 0°, 0°, 24°)	(4, 20°, 24°, 53°)	(8, 0°, 53°, 90°)
Ψ_3	(4, 0°, 0°, 32°)	(4, 20°, 32°, 60°)	(8, 0°, 60°, 90°)
Ψ_4	(4, 0°, 0°, 35°)	(4, 20°, 35°, 65°)	(8, 0°, 65°, 90°)

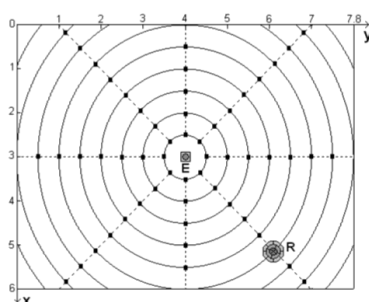


Figura 5.10. Plan de medidas utilizado en las simulaciones.

Para cada una de estas estructuras, se han realizado múltiples simulaciones utilizando el mismo recinto y parámetros de simulación que en el estudio realizado en el apartado anterior (ver Figura 5.5 y Tabla 5-2). Al igual que en dicho estudio, se ha situado al emisor en el centro del recinto orientado verticalmente hacia el techo, y se ha desplazado al receptor sobre círculos concéntricos respecto a la posición del emisor (Figura 5.10). En este caso, sobre cada uno de ellos, separados entre sí 0,5 metros, se consideraron ocho posiciones distribuidas uniformemente en acimut. Teniendo en cuenta que en un receptor que emplea detección en diversidad angular se dispone de tantos canales como sectores tiene el receptor, para cada una de las localizaciones del receptor sectorizado, se determinó la respuesta al impulso del canal formado por el emisor y cada uno de los dieciséis sectores que conforman cada receptor. Para determinar la salida del receptor se procesaron las señales detectadas por cada uno de los sectores mediante la utilización de la técnica de combinación del mejor sector o *best-sector*, en la cual se escoge como señal combinada, la recibida por el elemento detector con la menor dispersión de retardo [Lomba95].

En las Figuras 5.11(a) y (b) se representan, respectivamente, la media de la dispersión del retardo y de las pérdidas ópticas por propagación en función de la distancia entre el emisor y el receptor, para las cuatro estructuras de receptor consideradas. Estas curvas se han elaborado determinando los valores medios de los resultados obtenidos para todas las posiciones del receptor que se encuentran

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

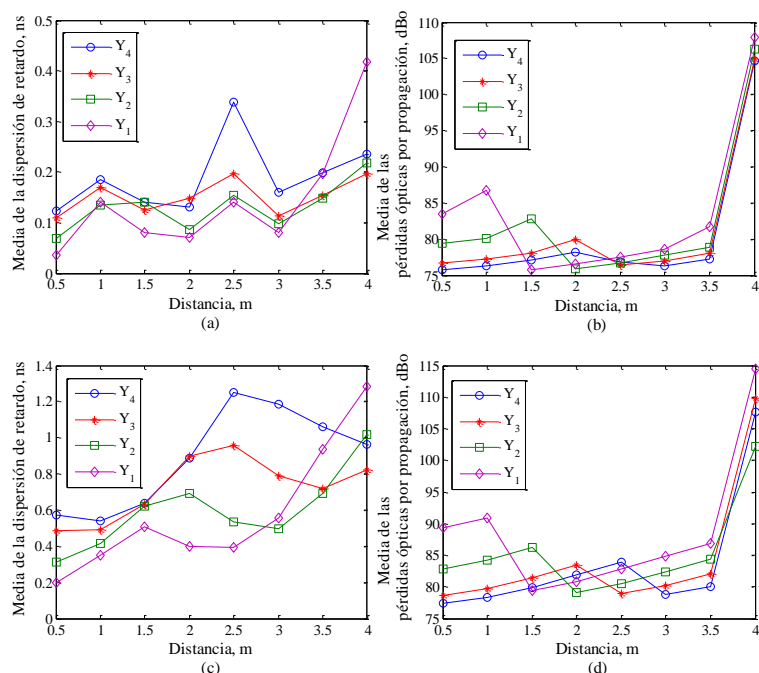


Figura 5.11. Media de la dispersión de retardo y de las pérdidas ópticas por propagación en función de la distancia entre el emisor y el receptor, para las cuatro estructuras simuladas. (a) y (b) Techo muy directivo. (c) y (d) Techo difuso.

a igual distancia del emisor. En las simulaciones se ha considerado que el techo del recinto está constituido por un material caracterizado por ser muy directivo, concretamente, por tener el mismo patrón de reflexión que la madera barnizada, definido por los parámetros del modelo de Phong recogidos en la Tabla 5-2. Los resultados muestran que cuando el receptor se encuentra cerca de la posición del emisor ($\leq 3\text{m}$), las estructuras de los receptores Ψ_1 y Ψ_2 , caracterizados por tener aperturas verticales pequeñas en su primera corona, son las que presentan los valores más bajos de dispersión, pero mayores pérdidas ópticas por propagación.

Cuando el receptor está localizado en zonas alejadas del emisor, como las próximas a las esquinas del recinto, las estructuras que en su primera corona presentan una mayor apertura vertical ($\geq 24^\circ$), como las Ψ_2 , Ψ_3 y Ψ_4 , exhiben valores de dispersión de retardo y pérdidas por propagación menores que los obtenidos con la estructura Ψ_1 . Si se comparan los cuatro receptores, se puede comprobar que con Ψ_2 se alcanza un comportamiento más estable para todas las

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

Tabla 5-5. Márgenes de variación de la dispersión de retardo y de las pérdidas ópticas por propagación para tres localizaciones del emisor.

Posición del emisor	Techo	Media de la dispersión de retardo, ns	Media de las pérdidas por propagación, dBo
		Mínimo - Máximo	Mínimo - Máximo
Centro del techo	Difuso	0,004 - 0,137	67,810 - 79,789
	Directivo	0,014 - 0,482	67,807 - 79,800
Esquina del aula	Difuso	0,017 - 0,171	59,830 - 81,074
	Directivo	0,017 - 0,933	59,835 - 83,759
Centro del aula (a 1 m del suelo)	Difuso	0,200 - 1,282	77,338 - 114,386
	Directivo	0,037 - 0,418	75,741 - 107,873

distancias de separación entre el emisor y el receptor, y un mejor compromiso respecto a los valores obtenidos para ambos parámetros.

En las Figura 5.11(c) y (d) se representan, respectivamente, la media de la dispersión de retardo y de las pérdidas ópticas por propagación en función de la distancia entre el emisor y el receptor, para las estructuras de receptor sectorizado estudiadas. Al igual que en el caso de las Figura 5.11(a) y (b), los valores medios son el resultado de promediar los resultados obtenidos en todas las posiciones del receptor que se encuentran a igual distancia del emisor. Sin embargo, en este caso se ha considerado que el techo del recinto está constituido por un material difuso, concretamente, por tener el mismo patrón de reflexión que el cemento, descrito por los parámetros del modelo de Phong expuestos en la Tabla 5-2. Se puede observar que tanto la media de la dispersión de retardo como las pérdidas ópticas por propagación muestran un comportamiento similar al caso estudiado con anterioridad, donde la superficie del techo se caracterizaba por presentar un comportamiento altamente especular. Es decir, de nuevo la estructura Ψ_2 es la que presenta los mejores resultados independientemente de la distancia a la que se encuentre el receptor respecto a la del emisor.

En todo el estudio realizado se ha situado al emisor en el centro del recinto y orientado verticalmente hacia el techo. Dicha elección se efectuó con el objetivo de disponer de un enlace en el que tanto la dispersión de retardo como las pérdidas por propagación fueran lo más sensibles posibles a las variaciones de la distancia entre el emisor y el receptor. Con el fin de comprobar la sensibilidad de los resultados obtenidos respecto a la posición del emisor, se repitieron las simulaciones anteriores para dos nuevas localizaciones del emisor. La primera con el emisor situado en el techo y orientado verticalmente hacia el suelo, y la segunda, con el emisor situado en una de las esquinas del recinto. En la Tabla 5-5 se muestran los márgenes de variación de ambos parámetros para las tres localizaciones del emisor, diferenciando entre las configuraciones con el techo difuso o especular. En todos los casos simulados, el receptor Ψ_2 es la estructura

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

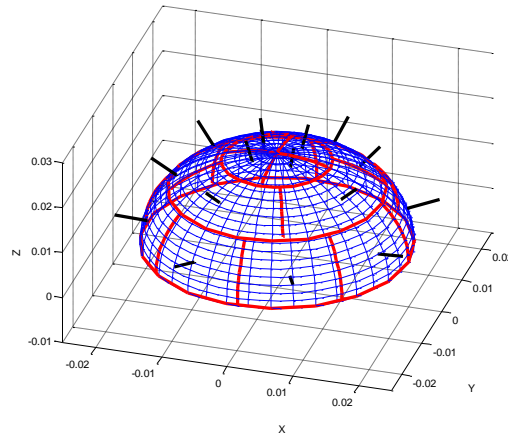


Figura 5.12. Receptor sectorizado Ψ_2 con 16 sectores distribuidos entre 3 coronas.

que reduce la dispersión de retardo y presenta un mejor compromiso respecto a las pérdidas ópticas por propagación.

En definitiva, la estructura del receptor sectorizado que mejores prestaciones presenta respecto a los parámetros que caracterizan el canal infrarrojo en interiores, constituida por dieciséis sectores distribuidos en tres coronas es la que se ha referenciado como $\Psi_2 = \{(4, 0^\circ, 0^\circ, 24^\circ), (4, 20^\circ, 24^\circ, 53^\circ), (8, 0^\circ, 53^\circ, 90^\circ)\}$, y cuya representación gráfica se representa en la Figura 5.12.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21



Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: <http://sede.ull.es/validacion>

Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

Capítulo 6

Recepción en diversidad angular para la interconexión de sensores mediante enlaces ópticos no guiados

En general, la topología para una red inalámbrica de sensores (*Wireless Sensor Network*, WSN) puede variar desde una distribución en estrella a una malla multisalto (*multihops*) de múltiples nodos de sensores. Las redes WSN actuales pueden englobar desde unos pocos nodos sensores hasta cientos de ellos, con ciertas capacidades sensitivas y de comunicación inalámbrica pudiendo constituir redes *ad hoc* sin infraestructura física preestablecida, ni gestión central. Un nodo sensor debe disponer de una unidad de detección, una unidad de procesamiento, un transceptor y una unidad de alimentación, aunque también puede poseer componentes adicionales dependiendo de la aplicación para la cual se ha diseñado la red. No obstante, hay que tener en cuenta que, además de que los nodos se deben poder comunicar entre sí a distancias cortas mediante una transmisión en difusión o *broadcast*, éstos están limitados en potencia, capacidad computacional y memoria. La mayoría de las redes de sensores inalámbricas están basadas en tecnología de RF, sin embargo, otro método utilizado para establecer la comunicación es mediante el uso de radiación IR. Las actuales redes de sensores infrarrojas no trabajan en difusión, sino que requieren que exista visión directa entre el emisor y el receptor, lo cual se podría solventar con el uso de receptores que empleen diversidad angular [Akyildiz02, Sharif09, Agrawal14].

Como se comentó con anterioridad, además de favorecer la comunicación en difusión, la detección en diversidad angular permite reducir el ruido debido a la iluminación ambiental, las pérdidas por propagación y la dispersión temporal debida a la multipropagación. Por este motivo, en este capítulo se comparan las prestaciones derivadas de utilizar tres tipos de receptores no formadores de imagen con detección en diversidad angular como elemento detector de la radiación óptica recibida por los nodos de una red de sensores infrarroja inalámbrica que trabaja en difusión o *broadcast* en ambientes de interior. Los receptores estudiados han sido: el receptor sectorizado en diversidad angular o SDR (*Sectorized angle-Diversity Receiver*) [Valadas94, Mendoza07], el receptor convencional en diversidad angular o CDR (*Conventional angle-Diversity Receiver*) [Rodríguez03a, Rodríguez13c], y el receptor auto-orientable o SOR (*Self-Orienting Receiver*) [Castillo-Vázquez03, Castillo-Vázquez04]. La comparación se ha llevado a cabo en términos de las mejoras obtenidas en cuanto a la dispersión de retardo, las pérdidas ópticas por propagación, la relación señal a ruido del canal y la

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

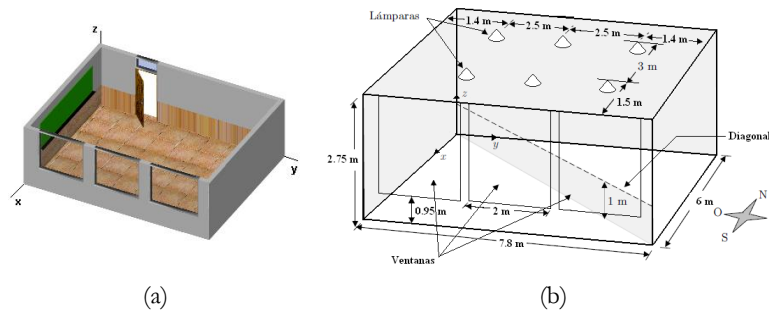


Figura 6.1. Aula 18 de la Sección de Física. (a) Representación gráfica 3D. (b) Dimensiones.

técnica de combinación empleada: máxima relación o MRC (*Maximal-Ratio Combining*), igual ganancia o EGC (*Equal-Gain Combining*) o mejor selección o SB (*Selection Best*).

Aunque la finalidad principal del estudio es comparar el uso de los tres receptores como etapa de entrada de los nodos de una red de sensores óptica no guiada que trabaja en *broadcast*, es decir, para enlaces que operan a velocidades de transmisión por debajo de 115 kb/s, también se ha extendido dicho estudio a enlaces trabajando a media/alta velocidad, como podría ser el caso de las redes de área local inalámbricas o WLAN.

6.1. Modelo de propagación.

En este apartado se presenta el modelo de propagación sobre el que se basan las simulaciones realizadas en este capítulo. Como entorno de simulación se ha elegido el recinto 3D representado en la Figura 6.1(a), el cual coincide con la forma geométrica del aula 18 de la Sección de Física, que ya ha sido empleada en las simulaciones efectuadas en el capítulo anterior. Como se puede observar, se trata de un recinto vacío con forma de prisma rectangular de $7,8 \times 6 \times 2,75 \text{ m}^3$, iluminado por luz artificial, que tiene su origen en seis lámparas incandescentes localizadas en el techo, y por luz natural procedente del sol, debido a las tres ventanas que ocupan la mayor parte de la pared orientada al sur.

Como se ha descrito con anterioridad, además de las superficies que conforman el entorno de simulación o ambiente de interior, el modelo de propagación hace referencia a la forma de aproximar el efecto del resto de los elementos presentes en un enlace óptico inalámbrico, es decir, el emisor, el receptor y las fuentes de ruido presentes en el canal. A continuación se describen los modelos matemáticos, y los parámetros de dichos modelos, utilizados para representar el efecto de cada uno de ellos en las simulaciones llevadas a cabo en este capítulo.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		

Tabla 6.1. Parámetros comunes para todas las simulaciones.

Parámetros		Valores		
Recinto:	Ancho (x), m	6		
	Largo(y), m	7,8		
	Alto(z), m	2,75		
Emisor:	Índice modal (n)	1		
	Potencia (P_e), mW	15 mW		
Receptor:	Responsividad (R), A/W	0,6 A/W		
CPC:	FOV	50°		
	Índice de refracción, n	1,8		
Filtro paso banda:	Pico de transmisión, T_0	0,92		
	Índice efectivo, n_e	2,293		
	Número de capas	20		
	Orden del filtro, m	3		
	Ancho de banda angular, $\Delta\psi$	50°		
	Ancho de banda espectral, $\Delta\lambda$	50 nm		
	λ_0	810 nm		
Filtro de paso de onda larga:	Pico de transmisión, T_0	0,99		
	Longitud de onda central, λ_0	780 nm		
	Ancho de banda espectral, $\Delta\lambda$	320 nm		
Lámparas de tungsteno:	Índice modal (n_l)	2		
	Densidad espectral de potencia	0,037 W/nm		
	Banda espectral de emisión	780 nm – 830 nm		
	(x_{lamp1} , y_{lamp1} , z_{lamp1}), m	(1,5, 1,4, 2,75)		
	(x_{lamp2} , y_{lamp2} , z_{lamp2}), m	(4,5, 1,4, 2,75)		
	(x_{lamp3} , y_{lamp3} , z_{lamp3}), m	(1,5, 3,9, 2,75)		
	(x_{lamp4} , y_{lamp4} , z_{lamp4}), m	(4,5, 3,9, 2,75)		
(x_{lamp5} , y_{lamp5} , z_{lamp5}), m	(1,5, 6,4, 2,75)			
(x_{lamp6} , y_{lamp6} , z_{lamp6}), m	(4,5, 6,4, 2,75)			
Ventanas:	Emitancia radiante espectral	0,2 W/nm/m ²		
	Área de las ventanas, m ²	3,6		
Parámetros de simulación:	Nº de rayos (N)	500.000		
	Resolución (Δt), ns	0,2		
	Tiempo máximo (t_{mix}), ns	120		
	Potencia mínima (P_{min}), pW	1		
Materiales:		ρ	r_d	m
	Madera	0,63	0,6	3
	Pizarra	0,75	0,3	97
	Cemento	0,40	1	-
	Mosaico	0,16	0,7	20
	Vidrio	0,03	0	280

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion			
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw	
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

6.1.1. Emisores y reflectores.

En todas las simulaciones realizadas, además de por su posición, orientación y potencia emitida P_E ; las fuentes ópticas o emisoras se han modelado como si fueran emisores puntuales con un perfil de radiación Lambertiano generalizado con simetría axial e índice modal n [Carruthers00, Jivkova00, Jivkova01, Kavehrad03, Al-Ghamdi04a, Castillo-Vázquez04].

En lo que se refiere a las superficies que conforman el recinto, su patrón de reflexión se ha aproximado mediante el modelo de Phong [Lomba98, Rodríguez02]. Como se describió en el capítulo 3, y según la ecuación (3.4), cada una de las superficies reflectoras queda caracterizada por tres parámetros: el porcentaje de reflexión difusa r_b , la directividad de la componente especular m , y el coeficiente de reflexión ρ . En la Tabla 6.1 se muestran los parámetros del modelo de Phong que caracterizan a los materiales presentes en el entorno de simulación, así como el resto de parámetros comunes a todas las simulaciones realizadas en el estudio efectuado en este capítulo.

6.1.2. Fuentes de ruido.

El ruido en los sistemas de transmisión ópticos inalámbricos está dominado por la suma del ruido *shot* debido a la iluminación ambiental presente en el recinto donde se establece el enlace, y del ruido térmico producido por la etapa de preamplificación. A continuación se describen los modelos utilizados para modelar ambos tipos de ruido.

6.1.2.1. Ruido debido a la iluminación ambiental.

Respecto al ruido debido a la iluminación ambiental, hay que distinguir entre el derivado de la iluminación artificial, procedente de las seis lámparas incandescentes situadas en el techo, y el producido por la iluminación natural, originado por la luz solar que atraviesa las tres ventanas de las que consta el recinto. En la Figura 6.1(b) se pueden observar gráficamente las posiciones de las lámparas y ventanas, y en la Tabla 6.1, las coordenadas cartesianas que definen dichas posiciones de las lámparas.

Según la ecuación (2.6) del capítulo 2, la varianza del ruido *shot* se puede expresar de la forma:

$$\sigma_{shot}^2 \approx 2qRP_{amb}I_2R_b \quad (6.1)$$

donde $q = 1,6 \times 10^{-19}$ C es la carga del electrón, R es la responsividad del fotodetector, R_b es el régimen binario de la transmisión, $I_2 = 0,562$ es una constante que depende del filtrado eléctrico empleado, y P_{amb} representa la potencia óptica total de ruido recibida por el detector debida a la iluminación

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

ambiental, calculada a partir de la suma de las potencias ópticas de ruido debidas a la iluminación artificial y natural, esto es:

$$P_{amb} = P_{art} + P_{nat} \quad (6.2)$$

A continuación se describen los modelos utilizados para computar las potencias ópticas debidas a la iluminación artificial P_{art} y natural P_{nat} .

Ruido debido a la iluminación artificial.

Para determinar la potencia óptica debida a la iluminación artificial procedente de las seis lámparas incandescentes de tungsteno de 100 W localizadas en el techo del recinto, se ha empleado el modelo descrito en el apartado 3.2.1 del capítulo 3. Cada una de las lámparas se modela como si fuese un emisor puntual L , con un perfil de radiación Lambertiano generalizado $R_L(\phi, n_L)$, de índice modal $n_L = 2$ y con una densidad espectral de potencia de 0,037 W/nm [Carruthers00]. Por lo tanto, para determinar la potencia óptica emitida por cada lámpara P_L , es necesario multiplicar su densidad espectral de potencia por el ancho de banda espectral $\Delta\lambda$, del filtro óptico empleado para rechazar el ruido ambiental en el receptor.

Para calcular la potencia óptica de ruido debida a la iluminación artificial, P_{art} procedente de cada una de las N_L lámparas presentes en el entorno de simulación, se ha utilizado la herramienta de simulación descrita en el capítulo 4, considerando que cada una de las lámparas se comporta como si fuese un emisor. Es decir, P_{art} se puede calcular sumando, para cada una de las lámparas, la contribución de potencia debida a la iluminación directa de la lámpara sobre el detector, y las debidas a las múltiples reflexiones. Por lo tanto, teniendo en cuenta la ecuación (3.12), la expresión que define P_{art} se puede escribir como:

$$P_{art} = \sum_{j=1}^{N_L} \left(\frac{1}{(d_{L,R})^2} R_L(\phi, 2) A_{ef}(\psi) + \sum_{n=1}^{M-1} P_n(L, R) \right) \quad (6.3)$$

donde $M = t_{max}/\Delta t$ es el número de intervalos de tiempo de ancho Δt , en los que se ha dividido el tiempo máximo de simulación t_{max} y P_n representa la potencia total detectada en el intervalo de tiempo n -ésimo de ancho Δt procedente de las múltiples reflexiones que sufre la radiación procedente de la lámpara L , antes de alcanzar al receptor.

Ruido debido a la iluminación natural.

Para evaluar la potencia óptica debida a la iluminación natural procedente de la luz solar que atraviesa las ventanas presentes en el recinto, se ha empleado el modelo propuesto en el apartado 3.3.2 del capítulo 3. Para calcular la contribución de potencia debida a la iluminación directa de la luz solar sobre el receptor, se divide cada una de las ventanas en N_e elementos emisores de igual

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

área y se determina dicha contribución directa entre cada elemento emisor y el receptor mediante la ecuación (3.26), la cual se reescribe a continuación:

$$P_{nat,j}^{LOS} = E_{nat} \Delta s \cdot \frac{1}{\pi} \cos(\phi_j) \frac{1}{(d_{j,R})^2} A_{ef}(\psi_j); \quad 1 \leq j \leq N_e \quad (6.4)$$

donde ϕ_j es el ángulo de emisión con respecto al vector normal de la superficie del j -ésimo elemento emisor, ψ_j es el ángulo de recepción de la radiación definido respecto a la orientación del receptor, d_j es la distancia entre el j -ésimo elemento emisor y el receptor, y $A_{ef}(\psi_j)$ es el área efectiva de detección. En este caso, se ha considerado que cada elemento de superficie de la ventana de área $\Delta s = 5 \times 5 \text{ cm}^2$, se modela como un emisor Lambertiano puro con una emitancia espectral definida por $E_{nat} = 0,2 \text{ W/nm/m}^2$ [Jivkova00, Carruthers00]; es decir, con una densidad espectral de potencia de emisión de $0,5 \text{ mW/nm}$.

Para computar la potencia óptica debida a las reflexiones que sufre la iluminación solar en las superficies del recinto antes de alcanzar al receptor, en el modelo se propone considerar a la ventana como un único elemento emisor con una densidad espectral de potencia de emisión de 720 mW/nm , desde donde se generan los N rayos con una orientación aleatoria generada según su diagrama de radiación, $R_{nat}(\phi, I)$, y con una posición aleatoria distribuida uniformemente sobre su superficie.

En definitiva, la potencia óptica total debida a la iluminación natural P_{nat} , se obtendrá sumando la contribución de potencia debida a la iluminación directa de los N_e elementos emisores sobre el receptor, y la debida de las múltiples reflexiones que sufre la iluminación procedente de la ventana considerada como un único emisor de acuerdo con la ecuación (3.13). Por lo tanto, la potencia óptica total debida a la iluminación natural vendrá dada por la expresión:

$$P_{nat} = \sum_{j=1}^{N_e} \left(E_{nat} \Delta s \cdot \frac{1}{\pi} \cos(\phi_j) \frac{1}{(d_{j,R})^2} A_{ef}(\psi_j) \right) + \sum_{n=1}^{M-1} P_n(E, R) \quad (6.5)$$

6.1.2.2. Ruido térmico.

En lo que se refiere al ruido térmico, tal y como se anticipó en el apartado 2.6.3.2 del capítulo 2, éste depende de la tecnología empleada en la etapa de amplificación. Por tanto, para poder evaluar la influencia del ruido térmico es necesario fijar una determinada estructura de recepción. En este estudio se ha seleccionado la configuración empleada por J. M. Kahn [Kahn97], en la que se asume el uso de fotodetectores PIN y una etapa preamplificadora de transimpedancia basada en tecnología FET (ver Figura 2.7).

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

Para calcular el ruido para dicha configuración se han seguido las pautas marcadas por Smith y Personick [Personick73, Smith80, Smith82]. Además de la configuración seleccionada, se ha considerado que el receptor está constituido por un único elemento fotodetector, que se realiza un filtrado eléctrico en recepción con una respuesta en frecuencia con forma de coseno alzado con un 100 % de exceso de ancho de banda, y que se asume que se transmite con una tasa de bit de R_b , usando una modulación OOK con pulsos de tipo NRZ. En estas condiciones, la varianza de ruido térmico se puede expresar como:

$$\sigma_{\text{térmico}}^2 = \frac{4k_B T}{R_f} I_2 R_b + \frac{16\pi^2 k_B T}{g_m} \left(\Gamma + \frac{1}{g_m R_D} \right) C_T^2 I_3 R_b^3 + \frac{4\pi^2 K I_D^a C_T^2}{g_m^2} I_f R_b^2 \quad (6.6)$$

donde k_B es la constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta, R_f es la resistencia de realimentación, g_m es la transconductancia, $C_T = C_d + C_g$ es la capacidad total de entrada, C_d la capacidad del fotodetector, C_g la capacidad de puerta, R_D la resistencia de polarización, Γ el factor de ruido del canal, K y a son coeficientes del ruido $1/f$ del canal del FET, I_D la corriente de oscuridad e I_2 , I_3 e I_f son constantes. Con la idea de incluir en dicha expresión la dependencia con el área de detección del fotodetector, A_R , se ha supuesto que éste presenta una capacidad constante por unidad de área η , de tal modo que $C_d = \eta A_R$. Reemplazando C_T por $\eta A_R + C_g$ en la ecuación (6.6), la varianza de ruido térmico se puede expresar de la forma:

$$\sigma_{\text{térmico}}^2 = \frac{4k_B T}{R_f} I_2 R_b + \frac{16\pi^2 k_B T}{g_m} \left(\Gamma + \frac{1}{g_m R_D} \right) (\eta A_R + C_g)^2 I_3 R_b^3 + \frac{4\pi^2 K I_D^a (\eta A_R + C_g)^2}{g_m^2} I_f R_b^2 \quad (6.7)$$

A continuación se recogen los valores utilizados para modelar el ruido en el estudio llevado a cabo en este capítulo, los cuales coinciden con los empleados por J. M. Kahn [Kahn97]. Se ha considerado un detector de espesor $w = 60$ nm, con $\eta = 175$ pF/cm², una resistencia de realimentación $R_f = 10$ k Ω , un FET con parámetros $g_m = 40$ mS, $C_g = C_{gs} + C_{gd} = 1$ pF, $R_D = 146$ Ω , $f_T = 6,4$ GHz, $\Gamma = 1,5$, $I_D = 20$ mA, $K = 294$ fA, $a = 1$, $I_2 = 0,562$, $I_3 = 0,0868$, $I_f = 0,184$, $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K y $T = 295$ K. Asumiendo estos parámetros, la parte del ruido total que corresponde a la contribución del ruido térmico en la ecuación (6.7), quedaría expresada únicamente en términos del área física del fotodetector A_R , y del régimen binario R_b . De esta forma, el valor del ruido térmico es fácilmente calculable para cada una de las ramas de un receptor basado en la utilización de múltiples elementos de detección, es decir, que emplea detección en diversidad angular.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

6.1.3. Simulación con un único elemento detector.

El modelo de propagación hace referencia a los modelos matemáticos necesarios para caracterizar el efecto de cada uno de los elementos que constituyen el enlace óptico inalámbrico: elementos emisores y reflectores, fuentes de ruido y receptores. En este apartado se presenta el estudio de la propagación de la señal infrarroja en el interior del recinto cuya configuración se representa en la Figura 6.1, empleando un emisor y un receptor óptico basado en un único elemento detector. Como se comentó con anterioridad, se trata de un recinto vacío que cuenta con iluminación ambiental de tipo artificial y natural, lo que produce el correspondiente ruido *shot* en el receptor. Las fuentes de ruido se han modelado de acuerdo con el modelo de ruido descrito en el apartado anterior. En todas las simulaciones se ha localizado al emisor en el centro del recinto, a un metro de altura, orientado verticalmente hacia el techo, con un perfil de radiación Lambertiano de índice modal $n = 1$, y con una potencia de emisión de 15 mW. Además, se ha considerado que el receptor, está constituido por un fotodetector tipo PIN con una responsividad de $R = 0,6$ A/W, un FOV de 90° y un preamplificador de transimpedancia basado en el uso transistores FET, cuyos parámetros de diseño coinciden con los fijados en el apartado anterior. El resto de los parámetros utilizados en las simulaciones se muestran en la Tabla 6.1.

En la Figura 6.2 se muestra la distribución espacial de la potencia óptica recibida a un metro de altura en el interior del aula, considerando que el receptor tiene un área de $A_R = 1$ cm². Para obtener dicha distribución, es decir, para barrer todo el interior del recinto a un metro de altura, se ha desplazado al receptor, situado a un metro del suelo y orientado verticalmente hacia arriba, sobre una rejilla cuadrada con una resolución o muestreo espacial de 35 cm, y se ha determinado la potencia óptica recibida en cada posición. Como se puede observar, el valor máximo de potencia es de $3,16 \times 10^{-8}$ W, y el valor medio de $1,5 \times 10^{-8}$ W. Asimismo, los valores máximo y mínimos se obtienen cuando el receptor se sitúa en el centro y en las esquinas del recinto, respectivamente, correspondiendo estas últimas a las zonas más alejadas del emisor, con una diferencia entre ambas zonas de aproximadamente $0,03$ μ W (≈ 8 dB).

En las Figuras 6.3(a) y (b) se muestran las distribuciones espaciales de las potencias ópticas de ruido en el interior del recinto debidas a la iluminación artificial y natural, respectivamente. Respecto a la potencia de ruido debida a la luz artificial procedente de las lámparas, representada en la Figura 6.3(a), el valor máximo y el valor medio son de $35,5$ μ W y $22,7$ μ W, respectivamente. Como se puede observar, la potencia se distribuye de manera no uniforme, coincidiendo los máximos con las posiciones en las que el receptor se sitúa debajo de las lámparas. Esta variación, entre sus niveles de potencia máximos y mínimos, es de aproximadamente $25,5$ μ W ($\approx 5,4$ dB).

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: <http://sede.ull.es/validacion>

Identificador del documento: 866822 Código de verificación: fbsse0hw

Firmado por:	Fecha:
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

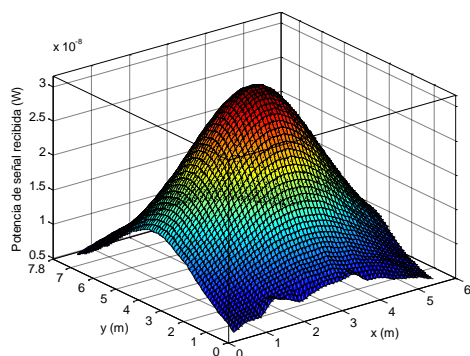
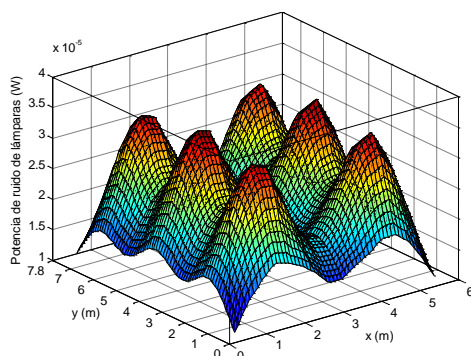
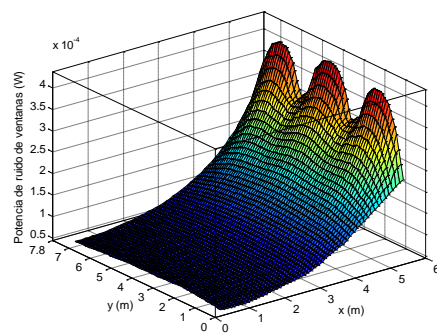


Figura 6.2. Distribución espacial de la potencia óptica media recibida a un metro de altura en el interior del aula 18, considerando un fotodetector de área $A_R = 1 \text{ cm}^2$.



(a)



(b)

Figura 6.3. Distribución espacial de la potencia óptica de ruido debida a la iluminación ambiental, para un fotodetector de área $A_R = 1 \text{ cm}^2$. (a) Artificial. (b) Natural.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/03/2017 02:32:55
	En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/03/2017 08:31:53
	En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	14/03/2017 13:45:07
	En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	14/03/2017 21:06:21
	En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	

En relación con la Figura 6.3(b), donde se representa la potencia óptica de ruido debida a la iluminación natural proveniente de la luz solar que atraviesa las ventanas, los valores máximos de potencia se encuentran en las zonas más próximas a las ventanas, situadas en la pared orientada al sur, disminuyendo a medida que el receptor se aleja hacia el lado opuesto del recinto. En este caso, los valores máximo y medio son de 438,4 μW y 134,6 μW , respectivamente, y la variación entre los valores máximo y mínimo supone una diferencia de aproximadamente 394,4 μW (≈ 10 dB).

Una vez obtenida la potencia óptica de ruido originada por la iluminación ambiental como la suma de las potencias debidas a la iluminación artificial y natural, $P_{amb} = P_{art} + P_{nat}$, es posible obtener el ruido *shot* aplicando la ecuación (6.1). Como se puede observar, tanto la varianza del ruido *shot* como del ruido térmico derivado de la etapa de preamplificación, dada por la ecuación (6.7), dependen del régimen binario o tasa de bit R_b , empleada en la transmisión, la cual está limitada por el área física del receptor A_R . Como el objetivo principal de este capítulo es estudiar el uso de receptores ópticos en diversidad angular para la interconexión de sensores, se ha seleccionado $R_b = 115$ kb/s como la máxima tasa de bit a la que se transmitiría en una red de sensores, y que es posible alcanzar sin restricciones con fotodetectores de $A_R = 1$ cm² [Mendoza07, Mendoza16]. En definitiva, considerando una tasa de bit de 115 kb/s, es posible obtener la relación señal a ruido recibida en el interior del recinto sin más que aplicar la ecuación (2.21), esto es:

$$SNR = \frac{(R P_r)^2}{\sigma_{total}^2} = \frac{(R P_r)^2}{\sigma_{shot}^2 + \sigma_{térmico}^2} \quad (6.8)$$

donde P_r representa la potencia óptica media recibida en cada una de las posiciones dentro del recinto (Figura 6.2), y R es la responsividad del receptor. En la Figura 6.4(a) se muestra la distribución espacial de la SNR recibida en el interior del aula, considerando que se emplea un receptor de 1 cm² en un enlace que opera a 115 kb/s. Como se puede observar, el valor máximo y el valor medio obtenidos son de 23,8 dB y 15,6 dB, respectivamente.

Con el fin de mostrar la influencia de la velocidad de transmisión y el tamaño del fotodetector sobre la SNR, en la Figura 6.4(b) se muestra la distribución de la SNR dentro del recinto, considerando que se utiliza un fotodetector de 3,53 mm² en un enlace que transmite a $R_b = 100$ Mb/s. En este caso, el máximo y el valor medio obtenido para la SNR son de -24,8 dB y -32,63 dB, respectivamente. Hay que tener en cuenta que los resultados se han obtenido para una potencia óptica emitida de 15 mW, pensada para interconectar los nodos de una red de sensores, donde dicha potencia de transmisión está limitada.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

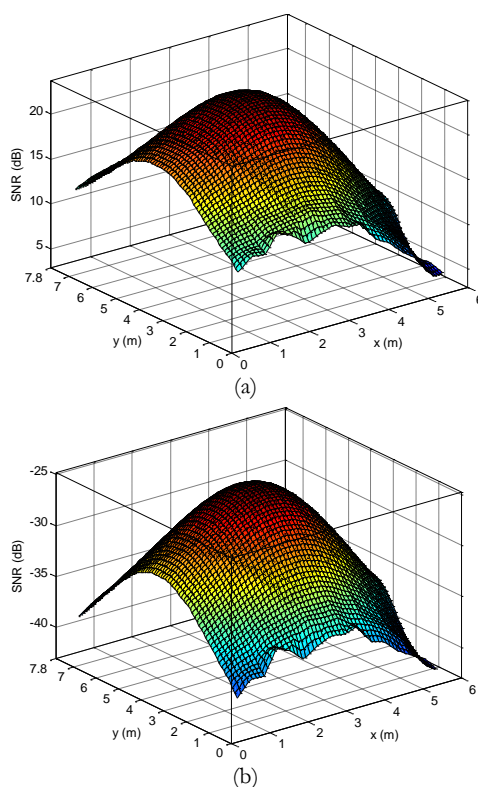


Figura 6.4. Distribución espacial de la SNR recibida en el interior del aula. (a) Receptor de área $A_R = 1 \text{ cm}^2$ y $R_b = 115 \text{ kb/s}$. (b) Receptor de área $A_R = 3,53 \text{ mm}^2$ y $R_b = 100 \text{ Mb/s}$.

Como se puede observar en dicha Figura 6.4(b), el centro del aula es el lugar donde la SNR es mayor y coincide con la zona donde se recibe una mayor contribución de la potencia óptica de señal a la vez que existe una baja influencia del ruido ambiental. También, se puede observar que independientemente de la tasa de bit, la SNR presenta en ambos casos una asimetría norte-sur causada por una mayor presencia de luz natural en el lado sur, procedente de las ventanas (ver Figura 6.1(b)). Estas variaciones norte-sur que se observan en la SNR son de 8,5 dB y 4,9 dB para los enlaces de baja y alta velocidad, respectivamente. Por otro lado, las zonas donde la SNR es mínima se encuentran en las esquinas del recinto, siendo además las esquinas próximas a las ventanas las que presentan los valores más reducidos. Esto es debido a que en estas zonas apenas llega contribución de señal desde el emisor y están más afectadas por el ruido ambiental natural.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

A modo de resumen, se pueden extraer como conclusión que la iluminación artificial proveniente de las lámparas, al no tener un patrón de radiación muy directivo, afecta de manera similar en todas las posiciones interiores del recinto, no pudiéndose apreciar sobre las curvas de SNR el efecto de las mismas. Este no es el caso de la iluminación natural procedente de las ventanas, cuyo efecto provoca una asimetría según la dirección norte-sur.

Por último, en la Figura 6.5 se muestran las contribuciones a la varianza del ruido total de la varianza del ruido *shot* y térmico en función del régimen binario o tasa de bit empleada, para el receptor estudiado, compuesto por un único elemento detector. Los resultados que se muestran en la Figura 6.5(a) corresponden a un fotodetector de 1 cm², y los de la Figura 6.5(b), a uno de 3,53 mm². En ambos casos, el receptor se encuentra situado en la posición $(x_R, y_R, z_R) = (4,2, 3,5, 1)$, una de las esquinas próxima a las ventanas. De los resultados obtenidos, se observa que cuando el área del detector es elevada y la tasa de bit es inferior a 10 Mb/s, el ruido térmico es prácticamente despreciable frente al ruido *shot* debido a la iluminación ambiental. Sólo para tasas de bit superiores a 10 Mb/s se observa el efecto dominante del ruido interno del preamplificador. Esto se debe a la dependencia cúbica que respecto a R_b muestra el segundo término de la ecuación (6.7) de la varianza del ruido térmico, el cual comienza a ser significativo respecto al resto de los términos de la ecuación.

Por otro lado, en la Figura 6.5(b), como era de esperar, para un fotodetector de menor área ($A_R = 3,53 \text{ mm}^2$), y por tanto con una capacidad del detector C_d menor, se obtienen menores niveles de ruido, y sólo para velocidades superiores a 70 Mb/s se observa un incremento de la varianza total de ruido debida a la influencia del ruido térmico.

6.2. Receptores con detección en diversidad angular.

De manera general, un fotodetector queda caracterizado por su posición, $\mathbf{p}_R = (x_R, y_R, z_R)$, su orientación \mathbf{n}_R , la cual suele expresarse mediante los ángulos de elevación y acimut (θ_R, φ_R) , y por su área efectiva de detección, $A_{ef}(\psi)$. Ignorando las pérdidas por reflexión, el área efectiva de detección viene definida por:

$$A_{ef}(\psi) = A_R \cos(\psi) \text{rect} \left[\frac{\psi}{FOV} \right] \quad (6.9)$$

$$\text{rect} \left[\frac{\psi}{FOV} \right] = \begin{cases} 1 & [x] \leq 1 \\ 0 & [x] > 1 \end{cases}$$

donde ψ es el ángulo de incidencia con respecto a la orientación del fotodetector (vector normal a su superficie), A_R su área física activa y FOV, su campo de visión.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

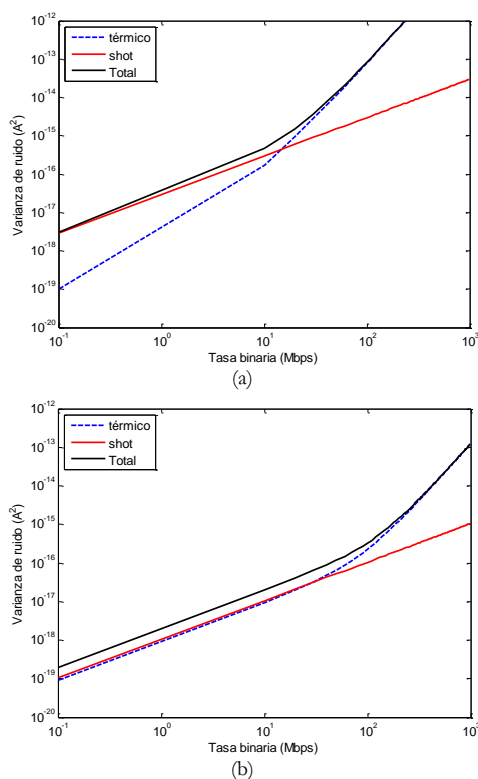


Figura 6.5. Varianzas de ruido *shot*, térmico y total en función de la tasa de bit. (a) Receptor de área $A_R = 1 \text{ cm}^2$. (b) Receptor de área $A_R = 3,53 \text{ mm}^2$.

En este apartado se presentan los modelos matemáticos utilizados para caracterizar los tres receptores no formadores de imagen con detección en diversidad angular que son objeto de análisis en este capítulo: el receptor sectorizado en diversidad angular o SDR (*Sectorized angle-Diversity Receiver*) [Valadas94, Mendoza07], el receptor convencional en diversidad angular o CDR (*Conventional angle-Diversity Receiver*) [Rodríguez03a, Rodríguez13c], y el receptor auto-orientable o SOR (*Self-Orienting Receiver*) [Castillo-Vázquez03, Castillo-Vázquez04].

6.2.1. Receptor sectorizado en diversidad angular.

Uno de los objetivos del capítulo 5 consistió en seleccionar la estructura del receptor sectorizado en diversidad angular o SDR, que mejores prestaciones

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

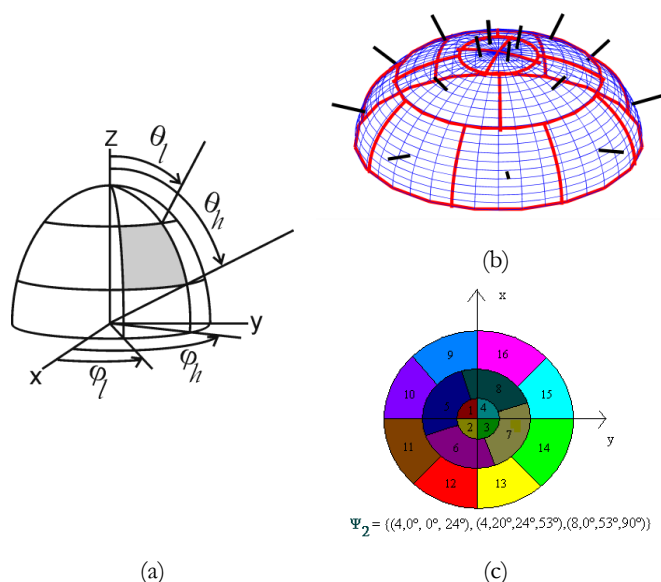


Figura 6.6. Receptor sectorizado con 16 sectores distribuidos entre 3 coronas. (a) Definición de los ángulos límites en elevación y acimut. (b) Representación gráfica. (c) Vista superior de la distribución en sectores.

presentaba respecto a los principales parámetros que caracterizan el canal óptico no guiado en ambientes de interior, concretamente, respecto a la dispersión de retardo y las pérdidas ópticas por propagación [Mendoza07]. Como resultado se propuso utilizar una estructura constituida por dieciséis sectores distribuidos en tres coronas, y cuya representación gráfica se muestra en la Figura 6.6.

Tal y como se describió en el capítulo anterior, un receptor sectorizado está formado por un conjunto de fotodetectores dispuestos de forma semiesférica [Valadas94, Lomba95]. Se entiende como corona el espacio de la semiesfera comprendido entre dos paralelos consecutivos, y como sector, la superficie de la corona confinada entre dos meridianos contiguos. Teniendo esto en cuenta que, todos los sectores que pertenecen a la misma corona se caracterizan por tener los mismos límites angulares en elevación e igual apertura acimutal. En resumen, la estructura del receptor sectorizado queda caracterizada por un conjunto de parámetros Ψ , donde se especifica, para cada una de las N_C coronas, el número de sectores en el que se divide la corona, N_s , el ángulo de *offset* en acimut que indica el ángulo acimutal a partir del cual comienza su primer sector, ε , y los límites angulares en elevación de la corona, θ_l y θ_h . En definitiva, el receptor

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

sectorizado con dieciséis sectores distribuidos en tres coronas que se muestra en la Figura 6.6 queda caracterizado por $\Psi = \{(4, 0^\circ, 0^\circ, 24^\circ), (4, 20^\circ, 24^\circ, 53^\circ), (8, 0^\circ, 53^\circ, 90^\circ)\}$, lo que significa que su primera corona consta de $N_s = 4$ sectores con un *offset* de acimut en su primer sector de $\varepsilon = 0^\circ$, y con unos límites angulares en elevación de $\theta_l = 0^\circ$ y $\theta_h = 24^\circ$. La configuración del resto de coronas se interpreta a partir de Ψ de manera similar.

Teniendo en cuenta lo anterior, y el modelo de receptor sectorizado propuesto en el apartado 5.1, cualquier SDR quedará caracterizado además de por su posición $\mathbf{p}_R = (x_R, y_R, z_R)$ y orientación, $\mathbf{n}_R = (\theta_R, \varphi_R)$ dentro del recinto, para cada uno de los sectores que lo componen habrá que especificar los siguientes parámetros: posición $\mathbf{p}_s = (x_s, y_s, z_s)$, orientación $\mathbf{n}_s = (\theta_s, \varphi_s)$, campos de visión vertical y horizontal (FOV_v y FOV_h), y su área efectiva de detección $A_s(\psi)$, la cual viene dada por la expresión:

$$A_s^e(\psi) = A_s T_s(\psi) \cos(\psi) \text{rect}\left(\frac{\psi}{\pi/2}\right) \quad (6.10)$$

donde $T_s(\psi)$ representa la transmitancia angular del filtro óptico utilizado para reducir los efectos de la iluminación ambiental que llega al fotodetector, ψ es el ángulo que forma el haz incidente con respecto a la orientación del sector y A_s representa el área física activa del sector, la cual se puede expresar como:

$$A_s = r^2 \cdot (\varphi_h - \varphi_l) \cdot (\cos \theta_l - \cos \theta_h) \quad (6.11)$$

donde r es el radio de la semiesfera del receptor.

En el caso del receptor sectorizado, el filtro óptico debería estar situado sobre su semiesfera o sobre cada uno de los sectores que lo componen. Esta situación permite que la radiación pueda incidir sobre el filtro y el fotodetector con cualquier ángulo de incidencia comprendido entre 0 y 90° . Como se comentó en el apartado 2.6.2 del capítulo 2, de las dos técnicas de filtrado óptico que se suelen emplear, el filtrado de banda estrecha, basado en el fenómeno de interferencia óptica, no se podría utilizar debido al desplazamiento, variación de la forma y la anchura que sufre su curva de transmisión a longitudes de onda más cortas cuando se incrementa el ángulo con el que incide la radiación (ver Figura 2.2(b)). Es decir, como ψ puede tomar cualquier valor entre 0° y 90° , la señal recibida por cada sector estaría sometida a un filtrado diferente dependiendo del ángulo con el que incide la radiación.

La opción más adecuada es utilizar un filtro óptico de paso de onda larga basado en el fenómeno de absorción (ver Figura 2.2(a)). Estos filtros se caracterizan por permitir el paso de la radiación con una longitud de onda superior a su longitud de onda de corte. Además, presentan una transmitancia prácticamente constante e independiente del ángulo con el que incide la

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

radiación, esto es, $T_s(\psi) = T_0$ para todas las longitudes de onda superiores a la de corte. Dado que el silicio no responde a longitudes de onda superiores a 1.100 nm, la combinación de estos filtros y el fotodetector exhibirá una respuesta óptica propia de un filtro de banda estrecha que eliminaría las longitudes de onda inferiores a la de corte del filtro y las superiores a 1.100 nm, la máxima longitud de onda de respuesta del silicio. En el estudio se ha asumido que el receptor sectorizado utiliza un filtro de absorción con una longitud de onda de corte de 780 nm, en concreto el filtro considerado es el Schott RG-780, cuya curva de transmisión se muestra en Figura 2.2(a). Este filtro presenta para las longitudes de onda superiores a la de corte, una transmitancia constante de $T_0 = 0,99$, y como consecuencia, se dispondrá de ancho de banda espectral de recepción, resultante de la combinación filtro-fotodetector, de $\Delta\lambda = 320$ nm.

6.2.2. Receptor convencional en diversidad angular.

Otra de las estructuras estudiadas es el receptor convencional en diversidad angular o CDR. En general, un receptor convencional en diversidad angular está formado por múltiples fotodetectores orientados en diferentes direcciones, los cuales pueden incorporar un filtro óptico y un concentrador no formador de imagen, tal como el concentrador parabólico compuesto o CPC (*Compound Parabolic Concentrator*) esquematizado en la Figura 6.7(a), o una lente semiesférica. En concreto, la estructura receptora que se ha utilizado en el estudio de comparación realizado, es la propuesta por S. Rodríguez en [Rodríguez13c], como resultado de un estudio centrado en obtener la estructura del receptor convencional que presentase las mejores prestaciones con respecto a los parámetros que caracterizan el canal. El receptor, representado en la Figura 6.7(b), está formado por siete elementos detectores, uno orientado verticalmente hacia arriba y los otros seis formando un ángulo de 56° respecto a la vertical, con una separación en acimut de 60° . Cada uno de los elementos está equipado con un filtro óptico interferométrico de banda estrecha y un CPC que presenta un FOV = 50° .

De forma análoga al SDR, el CDR queda caracterizado además de por su posición $\mathbf{p}_R = (x_R, y_R, z_R)$ y orientación, $\mathbf{n}_R = (\theta_R, \varphi_R)$ dentro del recinto, para cada elemento detector hay que especificar su FOV y área efectiva de detección $A_{ef}^s(\psi)$. Ignorando las pérdidas por reflexión, el área efectiva de detección de un detector equipado con un filtro óptico y un concentrador no formador de imagen, viene dada por:

$$A_{ef}^s(\psi) = A_R T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) \text{rect}\left(\frac{\psi}{\psi_c}\right) \quad (6.12)$$

donde A_R es el área del detector, ψ es el ángulo de incidencia con respecto a la orientación del detector, $T_s(\psi)$ representa la transmitancia angular del filtro, $g(\psi)$

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

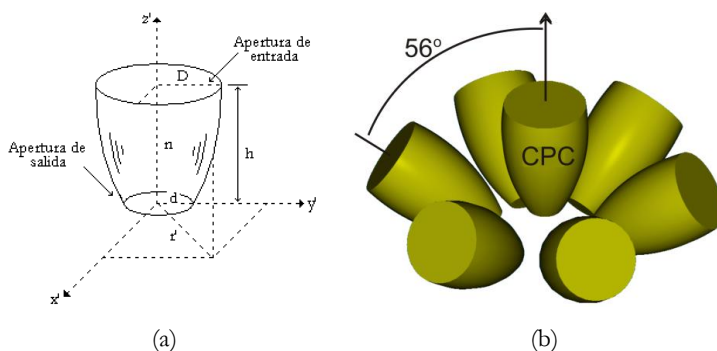


Figura 6.7. Receptor convencional en diversidad angular. (a) Parámetros de diseño de un CPC. (b) Receptor convencional de siete detectores equipados con filtro y un CPC de FOV = 50° [Rodríguez13c].

es la ganancia del concentrador, y ψ_c es el FOV del concentrador, cuyo valor es menor o igual a $\pi/2$. En el modelo ideal, un concentrador no formador de imagen de índice de refracción n se caracteriza por presentar un valor de ganancia constante dentro de su campo de visión y por no introducir ningún retardo debido a la propagación de la radiación en su interior [Kahn97]:

$$g(\psi) = \frac{n^2}{\text{sen}^2 \psi_c} \text{rect} \left(\frac{\psi}{\psi_c} \right) \tag{6.13}$$

En el modelo propuesto por S. Rodríguez, se incorpora, respecto al modelo ideal, una función de eficiencia óptica $\eta(\psi)$, que representa las pérdidas por reflexión del concentrador, y el retardo $t(\psi)$ debido a la propagación de la radiación en su interior [Rodríguez03a]:

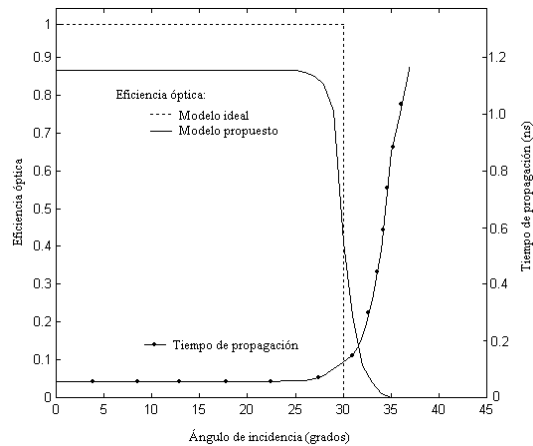
$$g(\psi) = \frac{n^2}{\text{sen}^2 \psi_c} \eta(\psi) \text{rect} \left(\frac{\psi}{\pi/2} \right), \quad t(\psi) \neq 0 \tag{6.14}$$

Reemplazando $g(\psi)$ en la ecuación (6.12), el área efectiva de detección toma la forma:

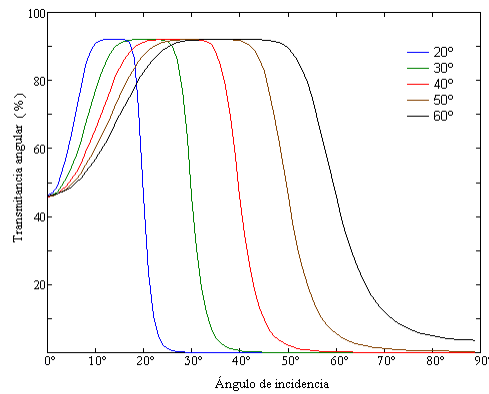
$$A_{e,f}^{c,f}(\psi) = \frac{n^2 A_R T_s(\psi) \cos(\psi)}{\text{sen}^2 \psi_c} \eta(\psi) \text{rect} \left(\frac{\psi}{\pi/2} \right), \quad t(\psi) \neq 0 \tag{6.15}$$

La eficiencia óptica del concentrador $\eta(\psi)$, da cuenta de las pérdidas por reflexión y las debidas a la no idealidad del concentrador, es decir, representa la fracción de la potencia que incidiendo con un ángulo ψ sobre la apertura de entrada, emerge por la apertura de salida. El retardo $t(\psi)$ representa el tiempo que

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21



(a)



(b)

Figura 6.8. (a) Eficiencia óptica y retardo de propagación para un CPC con un FOV de 30°. (b) Transmitancia angular de filtros paso banda para diferentes FOV.

emplea la radiación para alcanzar la apertura de salida, es decir, el tiempo de propagación de la señal en el interior del concentrador. En la Figura 6.8(a) se muestra un ejemplo de la eficiencia óptica y el retardo de propagación obtenidos para un CPC utilizando el modelo ideal y el propuesto, en función del ángulo con el que incide la radiación. Se ha considerado que el CPC está construido con un material dieléctrico de índice de refracción 1,8 y que se ha diseñado para que presente un FOV de 30° y una apertura de salida de $d = 5,64$ mm (fotodetector circular de 1 cm^2).

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

Para modelar el efecto del filtro interferométrico paso banda que se suele emplear con los CPC, se ha utilizado un modelo basado en cinco parámetros [Barry95, Ho95, Rodríguez03a, Rodríguez13c]. En este modelo, la función que define la transmitancia angular para una radiación de longitud de onda λ_0 , que incide con un ángulo ψ , viene determinada a través de la expresión:

$$T(\psi; \Delta\lambda, \psi') = \frac{T_0}{1 + \left[\frac{\lambda_0 - \lambda'(\psi; \psi')}{\Delta\lambda/2} \right]^{2m}} \quad (6.16)$$

donde ψ' es la orientación del filtro, m es el orden del filtro, T_0 es el pico de transmisión para ψ' , $\Delta\lambda$ es el ancho de banda espectral, y $\Delta\psi$ es el ancho de banda angular a -3dB respecto al valor en ψ' . La función $\lambda'(\psi; \psi')$ representa el desplazamiento espectral de la transmitancia angular del filtro dependiendo del ángulo con el que incide la radiación, según la expresión:

$$\lambda'(\psi; \psi') = \lambda_0 \left(\frac{n_s^2 - n_i^2 \sin^2 \psi}{n_s^2 - n_i^2 \sin^2 \psi'} \right)^{1/2} \quad (6.17)$$

donde n_i es el índice de refracción de la capa de entrada del filtro y n_s es un índice efectivo. El filtro se diseña de forma que su ancho de banda angular, $\Delta\psi$, coincida con el FOV del concentrador y así poder disponer del mínimo ancho de banda espectral posible, lo que permite minimizar el efecto del ruido ambiental. La Figura 6.8(b) muestra la transmitancia angular del filtro diseñado para equipar un CPC construido con un material dieléctrico de índice de refracción 1,8 y diferentes FOV, donde $T_0 = 0,92$, $n_s = 2,293$, $n_i = 1$, $\lambda_0 = 810$ nm y $m = 3$. En concreto, en el receptor CDR considerado, cada elemento detector está equipado con un filtro interferométrico de banda estrecha adaptado a un CPC con un FOV de 50°.

6.2.3. Receptor auto-orientable.

La última estructura que se considera es la del receptor de cabezal auto-orientable o SOR, propuesta por M. Castillo-Vázquez [Castillo-Vázquez03, Castillo-Vázquez04], y cuya representación gráfica se muestra en la Figura 6.9. El receptor SOR está compuesto por un único cabezal óptico compuesto por un filtro, una lente convergente y un fotodetector. A su vez, este cabezal está montado sobre un sistema de orientación electromecánico controlado por un procesador digital de señal o DSP (*Digital Signal Processor*). Para seleccionar la orientación del cabezal, el sistema utiliza un estimador de la SNR y un algoritmo de búsqueda de la dirección de recepción que presenta la mejor SNR. El algoritmo de búsqueda está basado en una versión modificada del algoritmo de recocido simulado o SA (*Simulated Annealing*). Teniendo en cuenta su descripción, se puede decir que el receptor SOR actúa como un receptor en diversidad angular

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

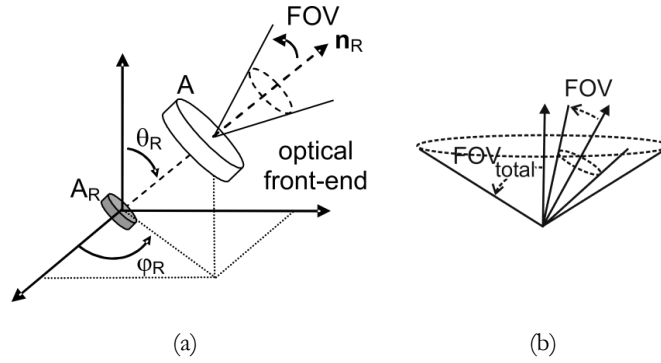
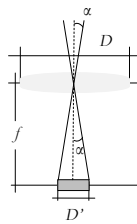


Figura 6.9. Receptor de cabezal auto-orientable (SOR).



Distancia focal: $f = \frac{D'/2}{\text{tg } \alpha} = \frac{R'}{\text{tg } \alpha}$

Diámetro de la lente: $D = f/N$

Ganancia óptica: $G = \frac{A}{A_R} = \left(\frac{R}{R'}\right)^2$

Figura 6.10. Relación entre los parámetros de diseño del cabezal del receptor auto-orientable. El parámetro N representa el número de apertura del sistema de lentes.

que emplea la técnica de combinación SB, y cuyos elementos presentan un FOV muy estrecho. En general, el receptor auto-orientable se puede caracterizar por los siguientes parámetros $\{p_R, n_R, \text{FOV}_{\text{total}}, A, A_R, \text{FOV}\}$, es decir, su posición y orientación dentro del recinto, su campo de visión total, área de apertura de la lente, área física del fotodetector y el FOV del cabezal, respectivamente. Por lo tanto, su área efectiva de detección se puede expresar como:

$$A_{ef}(\psi) = A_R T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) \text{rect}\left(\frac{\psi}{\pi/2}\right) \tag{6.18}$$

donde $T_s(\psi)$ representa transmitancia angular del filtro y $g(\psi) = G$ la ganancia óptica del cabezal. Reemplazando la ganancia G por A/A_R en la expresión anterior y asumiendo un filtro ideal, la expresión que define el área efectiva de detección del receptor auto-orientable se puede expresar como:

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

$$A_{ef}(\psi) = A_R G \cos(\psi) \operatorname{rect}\left(\frac{\psi}{\pi/2}\right) = A \cos(\psi) \operatorname{rect}\left(\frac{\psi}{\pi/2}\right) \quad (6.19)$$

De acuerdo con la propuesta de M. Castillo-Vázquez y la relación geométrica entre los parámetros de diseño del cabezal del receptor auto-orientable, ilustrada en la Figura 6.10, se ha considerado que el SOR utiliza un sistema de lentes positivas con un diámetro de apertura de $D = 1,5$ cm, junto a un fotodetector circular con área $A_R = 3,53$ mm² y responsividad $R = 0,6$ A/W. El concentrador proporciona una ganancia óptica elevada, aproximadamente de $G = 50$, a expensas de un FOV reducido, sólo de 3°. Este valor extremadamente pequeño de FOV permite utilizar un filtro óptico interferométrico paso banda ideal con un ancho de banda espectral estrecho, $\Delta\lambda = 50$ nm, que permite minimizar el efecto del ruido ambiental.

6.3. Estudio comparativo de receptores en diversidad angular.

El objetivo inicialmente planteado en este trabajo de Tesis ha sido estudiar mediante simulación la utilización de receptores no formadores de imagen en diversidad angular para la interconexión de nodos de una red de sensores óptica inalámbrica basada en una malla multisalto que opera en ambientes de interior. Para poder alcanzar dicho objetivo, se ha desarrollado una herramienta de simulación y un modelo de propagación que, entre todas sus posibles aplicaciones, permite determinar la respuesta al impulso del canal óptico inalámbrico en interiores de aquellos enlaces caracterizados por emplear algunas de las tres estructuras de recepción que son objeto de estudio en este trabajo: el receptor sectorizado en diversidad angular (SDR), el receptor convencional en diversidad angular (CDR) y el receptor auto-orientable (SOR). En general, en una red de sensores óptica inalámbrica multisalto, en las que no es necesario disponer de una infraestructura física preestablecida y no se requiere de gestión central, los nodos sensores se deben comunicar entre sí a distancias cortas mediante un enlace en difusión que transmite a baja velocidad, normalmente con una tasa de bit o un régimen binario inferior a 115 kb/s.

En definitiva, en este apartado se comparan las prestaciones de las tres estructuras de recepción, cuyos modelos han sido descritos con anterioridad en el apartado 6.2 y representadas en las Figuras 6.6, 6.7 y 6.9, cuando se emplean como elemento detector de la radiación óptica recibida por los nodos de una red de sensores infrarroja que trabaja en difusión o *broadcast* en ambientes de interior con una velocidad máxima de transmisión de bit de 115 kb/s. La comparación se ha realizado en términos de las mejoras obtenidas en cuanto a la dispersión de retardo (τ_{rms}), las pérdidas ópticas por propagación (PL), la relación señal a ruido recibida (SNR) y la técnica de combinación empleada: combinación por máxima relación (MRC), por igual ganancia (EGC) o mejor selección (SB) (apartado 2.6.5 del capítulo 2). Para caracterizar el resto de elementos que conforman el enlace

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

óptico inalámbrico: emisores, reflectores y fuentes de ruido, se ha hecho uso del modelo de propagación descrito en el apartado 6.1. En la Tabla 6.1 se muestran los parámetros comunes a todas las simulaciones realizadas en los estudios efectuados en este apartado.

Aunque la finalidad del estudio ha consistido en comparar el uso de las tres estructuras de recepción en diversidad angular como etapa de entrada de los nodos de una red de sensores infrarroja que trabaja en difusión en ambientes de interior y que opera con una tasa máxima de bit de 115 kb/s, en este apartado también se ha extendido dicho estudio a enlaces trabajando a media/alta velocidad, como es el caso de las redes WLAN. A continuación se muestran los resultados derivados del estudio para enlaces en difusión que transmiten a baja velocidad (redes de sensores) y media/alta velocidad (redes WLAN).

6.3.1. Enlaces de baja velocidad: redes de sensores.

Para realizar el estudio comparativo de las tres estructuras de recepción en diversidad angular como etapa de entrada de los nodos de una red de sensores infrarroja en ambientes de interior, se ha supuesto que la red se establece en el interior del recinto mostrado en la Figura 6.1, y que la interconexión de los nodos sensores se realiza mediante enlaces que trabajan en difusión y que operan con una tasa de bit de 115 kb/s.

Como se ha indicado con anterioridad, en la actualidad se busca que las redes de sensores inalámbricas (WSN) puedan constituir redes *ad hoc* sin una infraestructura física preestablecida, es decir, que el funcionamiento de la red no dependa de la configuración o ubicación de sus nodos sensores. Esto significa que cualquier estudio planteado sobre la interconexión de los nodos de una red WSN se debe realizar de forma que los resultados obtenidos no dependan de las localizaciones de los nodos sensores, es decir, que sean independientes de las posiciones del emisor y receptor consideradas dentro del recinto. Por este motivo, en el estudio se han distinguido dos configuraciones. En la primera de ellas, el nodo emisor se ha situado en el centro del recinto y los múltiples nodos receptores se han ubicados en 37 posiciones distribuidas de manera uniforme a lo largo de la diagonal que atraviesa el recinto de noroeste a sureste [Carruthers00], mientras que en la segunda, el nodo receptor es el que se encuentra en el centro y los nodos emisores se distribuyen sobre dicha diagonal.

En todos los casos se ha considerado que los emisores y receptores ópticos de los nodos sensores están orientados verticalmente hacia el techo y a un metro de altura sobre el suelo. Además, con la idea de comparar los tres receptores en las mismas condiciones, se han fijado los parámetros de los receptores para que las áreas de sus elementos fotodetectores posean un tamaño prácticamente similar. En concreto, se ha considerado que los siete elementos del receptor convencional en diversidad angular emplean fotodetectores con un área física de

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

$A_R = 1 \text{ cm}^2$, y que los sectores de la primera, segunda y tercera corona del receptor sectorizado en diversidad angular poseen un área de $0,27 \text{ cm}^2$, $0,95 \text{ cm}^2$ y $0,92 \text{ cm}^2$, respectivamente, lo cual se consigue fijando el radio de la semiesfera que define el receptor en $r = 1,4 \text{ cm}$. En lo que se refiere al receptor auto-orientable o SOR, se ha asumido que éste emplea un fotodetector circular con un área de $3,53 \text{ mm}^2$ y un sistema de lentes positivo con un diámetro de apertura de $1,5 \text{ cm}$. Si se hubiera elegido un fotodetector de área 1 cm^2 y teniendo en cuenta los parámetros de diseño del SOR (apartado 6.1.4), el diámetro del sistema de lentes a utilizar sería de 8 cm , dando lugar a un tamaño de cabezal que requeriría un sistema de orientación electromecánico inapropiado para formar parte de un nodo sensor, normalmente limitado en tamaño, potencia, capacidad computacional y memoria.

Configuración 1: emisor en el centro.

En las Figuras 6.11(a) y (b) se representan, respectivamente, la dispersión de retardo y las pérdidas ópticas por propagación en función de la distancia del receptor respecto al emisor, situado en el centro del recinto, a lo largo de la diagonal que atraviesa el recinto de noroeste (valores negativos del eje x) a sureste (valores positivos del eje x). Los parámetros se obtuvieron para las tres estructuras de recepción en diversidad angular consideradas: el receptor sectorizado en diversidad angular (SDR), el receptor convencional en diversidad angular (CDR) y el receptor auto-orientable (SOR); y en el caso de las estructuras que emplean múltiples elementos de detección, como el SDR y el CDR, considerando las siguientes técnicas de combinación: combinación por máxima relación (MRC), combinación por igual ganancia (EGC) y mejor selección (SB).

Como se puede observar en la Figura 6.11(a), independientemente del receptor y técnica de combinación empleada, el valor de la dispersión de retardo es inferior a $5,5 \text{ ns}$. Nótese también, que el valor de las curvas que definen la dispersión disminuye hacia el centro de la diagonal, donde la estructura receptora está muy próxima al emisor y con alguno de sus elementos detectores orientado hacia el centro del techo, de donde proviene casi la totalidad de la potencia que alcanza al receptor tras sufrir una única reflexión. A medida que el receptor se aleja del emisor hacia las esquinas del aula, aumenta el número de réplicas de la señal transmitida que llegan al receptor con tiempos de propagación diferentes, lo que provoca el correspondiente incremento en la dispersión temporal.

Cabe recordar que la dispersión de retardo constituye una medida de la dispersión debida a la multipropagación que sufre la señal antes de alcanzar al receptor, la cual es independiente del área del receptor, la potencia óptica de transmisión y la tasa de bit empleada. En este sentido, suponiendo un sistema de transmisión OOK en banda base con pulsos de tipo NRZ y sin ecualización, que emplea como sistema receptor aquel cuyo comportamiento es óptimo para un canal de tipo AWGN en ausencia de ISI, según el criterio de máxima semejanza o

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

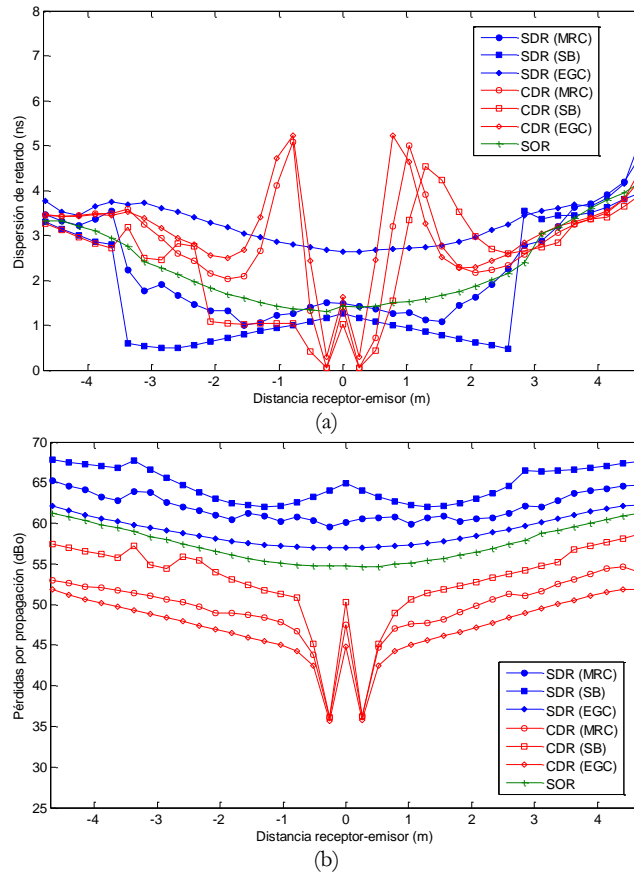


Figura 6.11. Parámetros del canal frente a la distancia receptor-emisor con el emisor situado en el centro del aula, en función del receptor en diversidad angular y la técnica de combinación empleada. (a) Dispersión de retardo. (b) Pérdidas por propagación.

probabilidad, si la dispersión de retardo máxima es de 5,5 ns, se puede establecer como la máxima tasa de bit alcanzable sin que se produzca ISI el valor de $R_b = 1/(2\tau_{rms}) = 1/(2 \times 5,5 \text{ ns}) = 91 \text{ Mb/s}$. Por otro lado, si en general lo que se desea es que la respuesta en frecuencia presente un comportamiento plano, es decir, la señal transmitida no sufra distorsión, o ésta sea despreciable, se debería escoger un tiempo de símbolo diez veces mayor que la dispersión de retardo τ_{rms} [Kahn97]. En este caso, la velocidad máxima de transmisión de símbolo o de bit, modulación OOK, vendrá dada por $R_b = 1/(10\tau_{rms}) = 18 \text{ Mb/s}$.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

De acuerdo con lo comentado, se podría decir que la dispersión de retardo no constituye un parámetro significativo que posibilite seleccionar la estructura de recepción y técnica de combinación que mejores presentaciones proporciona, pues todas las estructuras presentan una dispersión temporal inferior a 5,5 ns, lo que posibilita alcanzar una tasa de transmisión de 115 kb/s. Este no es el caso de las pérdidas ópticas por propagación mostradas en la Figura 6.11(b), donde se puede observar que las pérdidas obtenidas con las estructuras receptoras CDR y SOR son menores que las obtenidas con el SDR. Esto se debe principalmente a que los fotodetectores de ambas estructuras emplean concentradores ópticos, a diferencia del SDR que carece de ellos. En concreto, la estructura CDR proporciona enlaces más eficientes en potencia que el SOR, puesto que emplea fotodetectores con un área física mayor. Las pérdidas ópticas obtenidas al utilizar el SOR son aproximadamente de 10 dBo mayores que las alcanzadas con el CDR empleando la técnica de combinación EGC, cuando el receptor está localizado en el centro del recinto.

En general, tanto el receptor sectorizado como el convencional presentan menores pérdidas por propagación, es decir, son más eficientes en potencia cuando se aplica la técnica de combinación EGC (Figura 6.11(b)). Esto se debe a que la potencia colectada por cada elemento detector es tenida en cuenta, o dicho de otra forma, la técnica EGC maximiza el FOV total del receptor. En el caso de la técnica MRC, contribuyen a la potencia total recibida principalmente aquellos elementos que presentan una buena SNR, y en SB, sólo es tenida en cuenta la radiación de la señal colectada por el elemento detector que posee la mejor SNR. En resumen, la técnica EGC ofrece un mejor comportamiento respecto a las pérdidas ópticas por propagación en un entorno donde el ruido es significativo y la distribución de potencia de la señal está uniformemente distribuida a lo largo del recinto.

Mención especial merece el comportamiento particular que muestra el receptor convencional con respecto a la dispersión de retardo y las pérdidas ópticas por propagación cuando el receptor se encuentra situado aproximadamente a 0,26 m del emisor. Los dos mínimos que se producen se deben a que en ambas posiciones casi la totalidad de la radiación proveniente del emisor es detectada por el elemento vertical del receptor CDR después de sufrir una única reflexión y con un ángulo de incidencia comprendido entre 20° y 50°, rango donde el elemento detector del receptor presenta su máximo rendimiento respecto a su ganancia ideal, como se puede observar en las curvas de transmitancia angular mostradas en la Figura 6.8(b), para un FOV de 50°. En ambas posiciones del receptor se obtienen unas pérdidas de 9 dBo menos que en las posiciones inmediatamente más cercanas y alejadas del emisor, donde ya se recibe la radiación después de sufrir más de una reflexión, y en la que un porcentaje de dicha radiación incide con un ángulo no comprendido entre 20° y 50°. Este comportamiento también se manifiesta en la Figura 6.12, donde se

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

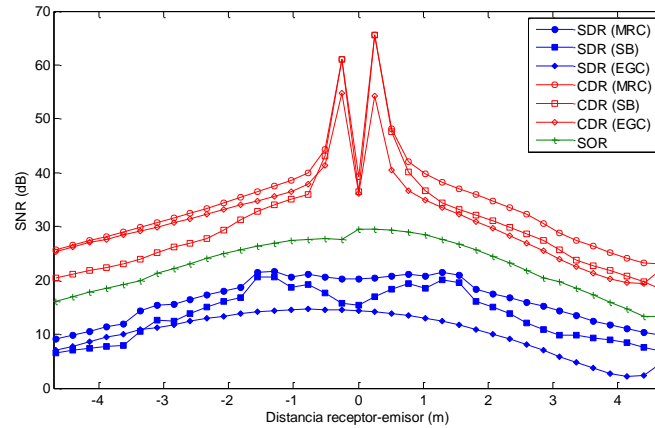


Figura 6.12. Relación señal a ruido recibida frente a la distancia receptor-emisor con el emisor situado en el centro del aula, en función del receptor en diversidad angular y la técnica de combinación empleada. Los resultados se obtuvieron para $P_E = 15$ mW y $R_b = 115$ kb/s.

representa la relación señal a ruido recibida frente a la distancia receptor-emisor, produciéndose dos valores máximos cuando el receptor se encuentra a 0,26 m del emisor. Esto está en concordancia con el hecho de que en ambas posiciones es donde se obtienen los mayores valores de potencia de señal recibida (menores pérdidas por propagación).

Como se comentó con anterioridad, en la Figura 6.12 se representa la relación señal a ruido recibida frente a la distancia receptor-emisor sobre la diagonal noroeste a sureste, en función del receptor en diversidad angular y la técnica de combinación empleada. Para calcular la SNR se ha aplicado la ecuación (6.8) para cada uno de los elementos detectores de los que consta cada receptor, calculando la varianza del ruido total como la suma del ruido *shot* debido a la iluminación ambiental y del ruido térmico del preamplificador. El procedimiento llevado a cabo coincide con el realizado en el apartado 6.1.3 para determinar la SNR recibida por un receptor constituido por un único elemento detector. Los resultados se han obtenido considerando que la potencia del emisor es de $P_E = 15$ mW, que se transmite con una tasa de bit de $R_b = 115$ kb/s, y empleando los modelos de ruido térmico y *shot* descritos en el apartado 6.1.2. Cabe resaltar que para determinar la potencia óptica total P_{amb} debido a la iluminación ambiental se ha tenido en cuenta que los anchos de banda espectrales de los filtros ópticos empleados para minimizar el efecto del ruido ambiental son de $\Delta\lambda = 50$ nm para los receptores CDR y SOR, y de 320 nm para el SDR.

Respecto a los resultados mostrados en la Figura 6.12, se puede observar que las estructuras CDR y SDR son las que presentan las mejores y peores SNR,

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

respectivamente, con una diferencia de 22 dB cuando el receptor se encuentra en el centro del aula, muy próximo al emisor. En general, la SNR disminuye a medida que el receptor se aleja del emisor y se acerca a las esquinas del aula, puesto que son las zonas donde se reciben los valores de potencia más bajos. Además cuando el receptor se encuentra cerca de la esquina sureste del recinto (valores positivos de x), los valores para la SNR son ligeramente más bajos que los obtenidos en la esquina noroeste. Esto se debe a que en la esquina sureste o más próxima a las ventanas, es donde los elementos detectores están más afectados por el ruido debido a la iluminación procedente de las ventanas. Esta ligera asimetría entre los dos extremos de la diagonal es más notable cuando en el receptor se emplea la técnica EGC, pues, si bien MRC utiliza las señales de más de un elemento detector con bajo ruido ambiental y la técnica SB sólo emplea la de uno de ellos, EGC emplea la de todos de manera indiferente. Esto está en concordancia con el hecho de que el receptor convencional y el sectorizado presenten la mejor SNR cuando la técnica de combinación empleada es MRC, seguida por SB y EGC. Sin embargo, aunque la diferencia entre los valores de SNR obtenidos con MRC y EGC es como máximo de 5 dB para el receptor CDR y 7 dB para el SDR, hay que tener en cuenta que el uso de las técnicas MRC y SB requieren implementar un estimador de la SNR para cada elemento detector, lo que se traduce en mayores requerimientos en cuanto a capacidad computacional y consumo.

En general, independientemente de la técnica de combinación utilizada, la estructura CDR muestra ser el receptor que presenta los mejores resultados en cuanto a las pérdidas ópticas por propagación y la SNR, simultáneamente. Aunque el receptor auto-orientable exhibe una SNR muy similar a la obtenida con el CDR, este último es más eficiente en potencia, con independencia de la técnica de combinación utilizada. Por otro lado, hay que tener en cuenta los inconvenientes derivados de la implementación de la estructura SOR frente a las otras dos, pues requiere desarrollar un estimador de la SNR y un sistema de orientación electromecánico que a través de un algoritmo de búsqueda sitúe el cabezal del receptor hacia la dirección donde se recibe la máxima SNR, lo que implicaría disponer de un nodo sensor con mayor capacidad computacional, consumo de potencia y tamaño. En definitiva, según todo lo comentado con anterioridad, la estructura CDR conjuntamente con la técnica de combinación EGC es la que proporciona los mejores resultados en cuanto a la SNR, eficiencia en potencia transmitida, capacidad computacional y consumo de energía.

En las Figuras 6.13(a), (b) y (c) se representan las distribuciones espaciales de los valores de SNR recibidos a un metro de altura en el interior del aula, para aquellas estructuras que mejores prestaciones presentaron en el estudio a lo largo de la diagonal, es decir, el CDR cuando emplea la técnica de combinación EGC, el SOR y el SDR también con EGC.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

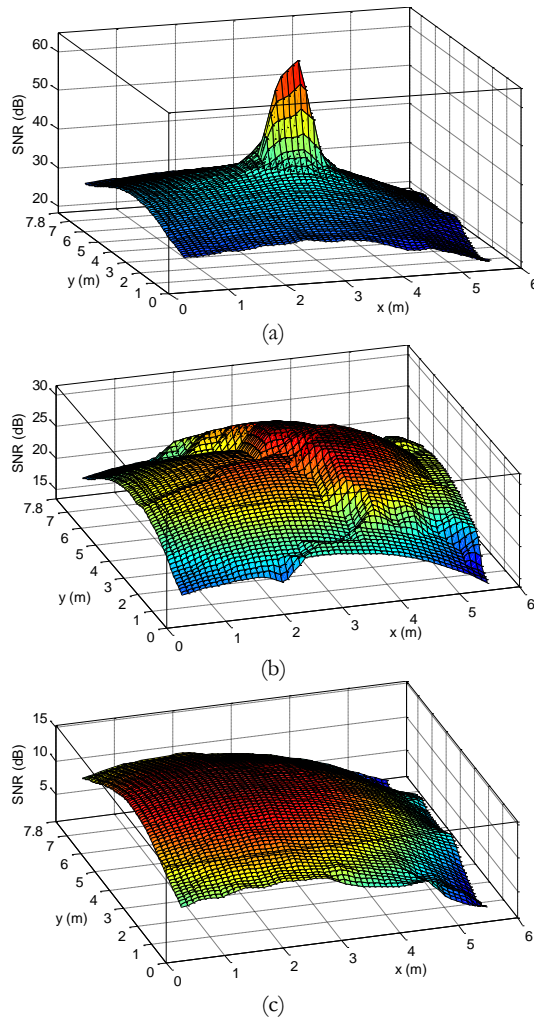


Figura 6.13. Distribución espacial de la SNR en el interior del recinto. (a) Receptor CDR con EGC. (b) Receptor SOR. (c) Receptor SDR con EGC.

Para obtener dicha distribución espacial, es decir, para barrer todas las posiciones en el interior del recinto, se ha desplazado al receptor sobre una rejilla cuadrada con una resolución o muestreo espacial de 35 cm. Al igual que en el estudio sobre la diagonal, tanto el emisor como el receptor se mantuvieron

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	Fecha:
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

orientados verticalmente hacia el techo y localizados a un metro de altura sobre el suelo. Se puede observar que, independientemente del receptor considerado, las distribuciones espaciales de la SNR muestran una ligera inclinación hacia la zona donde se encuentran las ventanas debido al efecto de la iluminación natural que las atraviesa. Además, sus máximos y mínimos se producen cuando el receptor está localizado, respectivamente, en zonas próximas a la posición del emisor y en las esquinas, alejadas del emisor.

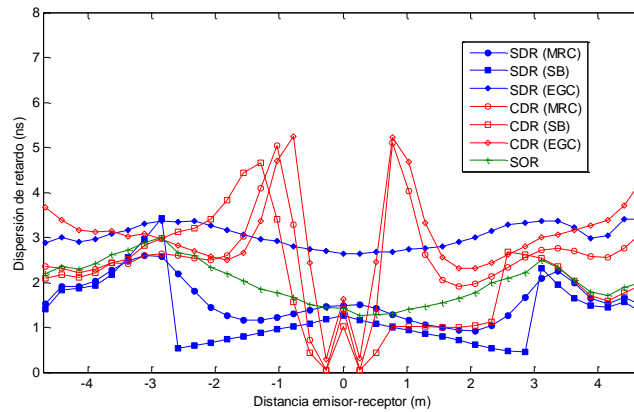
En el caso particular del CDR, la distribución de la SNR contrasta con la de las otras dos estructuras receptoras, pues presenta un máximo más pronunciado en la zona en la que el receptor se encuentra a una distancia inferior a 50 cm del emisor, tal y como se percibió sobre la diagonal. En general, las variaciones obtenidas entre el valor máximo y mínimo de los valores de SNR son idénticas a las observadas en la diagonal, poniendo de manifiesto que los estudios realizados a lo largo de la diagonal son representativos de los que se obtendrían en todo el interior del recinto.

Configuración 2: receptor en el centro.

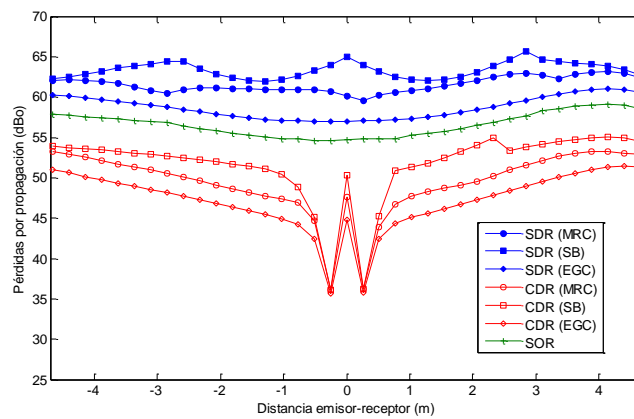
Una vez estudiada la primera configuración con el nodo emisor situado en el centro y el receptor ubicado en diferentes posiciones sobre la diagonal que atraviesa el recinto de noroeste a sureste, a continuación se muestran los resultados del estudio basado en la segunda configuración, es decir, con el nodo receptor localizado en el centro del aula y los emisores situados en 37 posiciones distribuidas uniformemente sobre dicha diagonal.

En las Figuras 6.14 (a) y (b) se representan, respectivamente, la dispersión de retardo y las pérdidas ópticas por propagación frente a la distancia del emisor respecto al receptor sobre la diagonal noroeste a sureste, en función del receptor en diversidad angular y la técnica de combinación empleada. Tal y como cabía esperar, al igual que en la configuración anterior, los valores de la dispersión de retardo vuelven a ser inferiores a 5,5 ns, muy por debajo del valor que impediría alcanzar una velocidad de transmisión de bit de 115 kb/s. Asimismo, también se puede observar que debido a la ganancia que les proporciona el sistema óptico que actúa de concentrador, las estructuras CDR y SOR son más eficientes en potencia que la SDR, puesto que presentan menores pérdidas por propagación a lo largo de la diagonal. Como ejemplo, cuando el emisor está localizado en el centro del recinto, muy próximo al receptor, el SDR y el SOR exhiben unas pérdidas ópticas aproximadamente de 12 dBo y 10 dBo superiores a las del CDR con la técnica de combinación EGC. Por lo que nuevamente el CDR resulta ser el receptor más eficiente respecto al aprovechamiento de la potencia transmitida por los emisores. Además, se vuelve a ratificar que al tratarse de un ambiente de interior donde el ruido debido a la iluminación ambiental es significativo y la señal se distribuye casi uniformemente por todo el interior del recinto

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21



(a)



(b)

Figura 6.14. Parámetros del canal frente a la distancia emisor-receptor con el receptor situado en el centro del recinto, en función del receptor en diversidad angular y la técnica de combinación empleada. (a) Dispersión de retardo. (b) Pérdidas por propagación.

(transmisión en difusión), de las tres técnicas de combinación estudiadas, EGC es la que proporciona las menores pérdidas ópticas por propagación.

Al igual que para la configuración anterior (emisor en el centro), las curvas de dispersión de retardo y pérdidas ópticas por propagación resultantes para el receptor CDR, revelan un valor mínimo cuando el emisor se encuentra aproximadamente a 0,26 m del receptor, situado en el centro del aula. La causa de

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

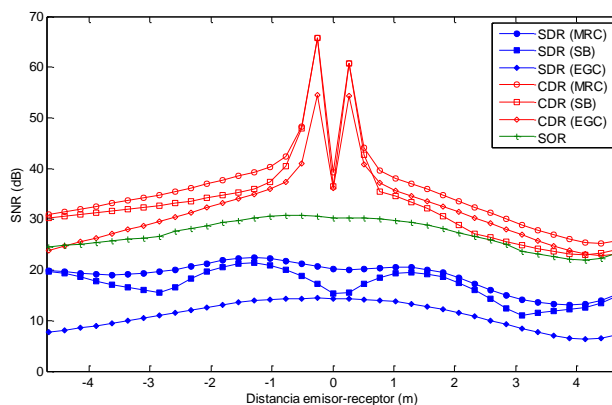


Figura 6.15. Relación señal a ruido recibida frente a la distancia emisor-receptor con el receptor situado en el centro del recinto, en función del receptor en diversidad angular y la técnica de combinación empleada. Los resultados se obtuvieron para $P_E = 15$ mW y $R_b = 115$ kb/s.

dicha variación coincide con la facilitada para la configuración anterior. Este efecto no se produce en los otros dos receptores, el SDR y el SOR, los cuales presentan un comportamiento más estable a lo largo de toda la diagonal, con un rango de variación máximo en cuanto a las pérdidas por propagación de 4 dB.

La relación señal a ruido recibida frente a la distancia desde el emisor hasta el receptor sobre la diagonal en función del receptor en diversidad angular y la técnica de combinación empleada, se muestra en la Figura 6.15. De nuevo, las estructuras CDR y SDR son las que presentan los valores más altos y más bajos de SNR, respectivamente, con una diferencia de 22 dB cuando el receptor se encuentra localizado en el centro del recinto. Independientemente del receptor utilizado, la SNR disminuye a medida que el emisor se aleja del receptor y se acerca a las esquinas del aula, acorde con los valores obtenidos para las pérdidas por propagación, y como se esperaba, tanto para el receptor convencional como para el sectorizado, el esquema MRC es el que proporciona mejores resultados, seguido de los esquemas SB y EGC. Sin embargo, si se tiene en cuenta el mayor consumo y coste computacional que requieren las técnicas MRC y SB, y que la diferencia entre la SNR obtenida con MRC y EGC es inferior a 5 dB en el caso del receptor CDR, se podría concluir que el receptor que mejores prestaciones presenta respecto a las pérdidas por propagación, SNR, coste computacional y consumo de energía, es el CDR conjuntamente con la técnica EGC.

Por último, asumiendo que se transmite con una tasa de bit de $R_b = 115$ kb/s, en un canal sin distorsión con una modulación OOK con pulsos de tipo NRZ, que se realiza un filtrado eléctrico en recepción con una respuesta en frecuencia con forma de coseno alzado con un 100 % de exceso de ancho de banda, y que el

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

ruido es de tipo gaussiano con una varianza total obtenida a partir de la suma de las varianzas de ruido *shot* y térmico, la tasa o probabilidad de error de bit (BER, *Bit Error Rate*), se puede expresar como [Kahn97]:

$$BER = Q(\sqrt{SNR}), \quad \text{donde } Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{y^2}{2}} \cdot dy \quad (6.20)$$

Según la ecuación anterior, si se plantea como objetivo obtener un BER de 10^{-9} , es necesario disponer de una SNR de 15,6 dB. Basándonos en los resultados de SNR mostrados en la Figura 6.15, los receptores CDR y SOR posibilitan alcanzar un BER inferior a 10^{-9} en cualquier posición de la diagonal, pues presentan una SNR superior a 20 dB. Con el receptor SDR, sólo se puede asegurar un BER inferior a 10^{-3} , puesto que el mínimo de sus curvas de SNR es aproximadamente de 10 dB. En definitiva, teniendo en cuenta todo lo anterior, se confirma que el receptor en diversidad angular que mejores prestaciones exhibe en relación con la eficiencia en potencia transmitida, la SNR o BER, requerimientos de capacidad computacional y consumo de energía, es el CDR con la técnica EGC.

6.3.2. Enlaces de media/alta velocidad.

Una vez realizado el estudio comparativo de las estructuras de recepción en diversidad angular para la interconexión de sensores mediante enlaces ópticos no guiados que transmiten como máximo a una tasa de bits de 115 kb/s, se ha trasladado dicho estudio a enlaces que operan con tasas de bit por encima de 1 Mb/s.

En las simulaciones realizadas se ha considerado el mismo plan de medidas presentado en el estudio a baja velocidad con el emisor ubicado en el centro del aula y el receptor localizado en 37 posiciones diferentes distribuidas uniformemente a lo largo de la diagonal que atraviesa el aula en sentido noroeste a sureste, de acuerdo con el escenario de simulación mostrado en la Figura 6.1. Tanto el emisor como el receptor están orientados verticalmente hacia el techo y situados a un metro de altura sobre el suelo. Se ha escogido nuevamente esta configuración para el emisor y receptor por ser aquella en la que las variaciones de la dispersión de retardo y las pérdidas ópticas por propagación son más sensibles frente a la distancia entre el receptor y el emisor [Mendoza07].

Con el fin de poder asegurar que los fotodetectores son capaces de responder a tasas de bit elevadas (superiores a 10 Mb/s), se ha reducido el tamaño de los fotodetectores empleados, fijando su área a un valor similar o próximo a $3,53 \text{ mm}^2$, que coincide con el tamaño del fotodetector del receptor de cabezal auto-orientable considerado en el estudio del apartado anterior. En concreto, se ha considerado que los siete elementos del receptor convencional en diversidad

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

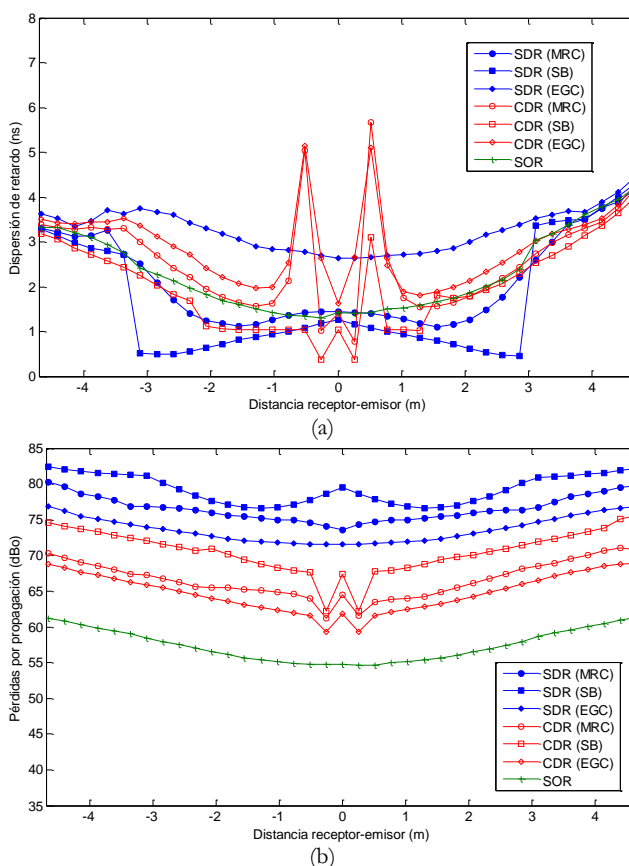


Figura 6.16. Parámetros del canal frente a la distancia receptor-emisor en función del receptor en diversidad angular y la técnica de combinación empleada. (a) Dispersión de retardo. (b) Pérdidas por propagación.

angular emplea fotodetectores de $3,53 \text{ mm}^2$, y que los sectores de la primera, segunda y tercera corona del receptor sectorizado poseen un área de $0,93 \text{ mm}^2$, $3,39 \text{ mm}^2$ y de $3,27 \text{ mm}^2$, respectivamente, lo cual se obtiene fijando el radio de su semiesfera en $r = 2,63 \text{ mm}$.

Con respecto a los filtros ópticos empleados para minimizar el efecto del ruido ambiental, se mantienen las características comentadas en el estudio a baja velocidad, es decir, se tiene en cuenta que sus anchos de banda espectrales son de $\Delta\lambda = 50 \text{ nm}$ para los receptores CDR y SOR, y de 320 nm para el SDR. El resto

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

de los parámetros utilizados también se muestran en la Tabla 6.1, la cual se expuso en el apartado 6.1, donde se describió el modelo de propagación.

En las Figuras 6.16(a) y (b) se representan, respectivamente, la dispersión de retardo y las pérdidas ópticas por propagación en función de la distancia desde el receptor hasta el emisor a lo largo de la diagonal noroeste (valores negativos del eje x) a sureste (valores positivos del eje x). Al igual que en el estudio anterior, los resultados se obtuvieron para las tres estructuras de receptores en diversidad angular: SDR, CDR y SOR; y en el caso de las estructuras que emplean múltiples elementos de detección, como el SDR y el CDR, considerando las técnicas de combinación MRC, EGC y SB. Si los resultados se comparan con los obtenidos a baja velocidad con el emisor situado en el centro del recinto, Figuras 6.11(a) y (b), se puede comprobar que las gráficas son muy similares en su forma. Es decir, a medida que el receptor se desplaza hacia las esquinas, alejándose del emisor, aumenta el número de réplicas de la señal original que alcanzan al detector con tiempos de propagación diferentes, provocando un incremento de la dispersión temporal a la vez que el enlace se hace menos eficiente en potencia. En general, las pérdidas por propagación para el receptor SDR y CDR han experimentado un incremento significativo respecto a las obtenidas a baja velocidad, debido al reducido tamaño de los fotodetectores empleados para que sean capaces de responder a tasas de bit elevadas. En concreto, el incremento es de 17 dB para el CDR y 14,6 dB para el SDR, considerando en ambos la técnica EGC. Este incremento en las pérdidas no afecta al SOR, pues el tamaño de su fotodetector coincide con el utilizado a baja velocidad, además, el receptor SOR es el que ostenta la mayor eficiencia en potencia, es decir, el que presenta las menores pérdidas por propagación.

En la Figura 6.17 se representa la relación señal a ruido recibida en función de la distancia del receptor al emisor sobre la diagonal noroeste a sureste, dependiendo del receptor en diversidad angular y la técnica de combinación empleada. La SNR se ha determinado siguiendo el mismo procedimiento que el realizado en el estudio a baja velocidad, considerando que la potencia emitida es de $P_E = 600$ mW, que se transmite con una tasa de bit de $R_b = 50$ Mb/s y que los anchos de banda espectrales de los filtros ópticos empleados para minimizar el efecto del ruido ambiental son de $\Delta\lambda = 50$ nm para los receptores CDR y SOR, y de 320 nm para el SDR. De los resultados obtenidos, se puede apreciar que respecto a los logrados a baja velocidad, mostrados en la Figura 6.12, se produce un empeoramiento de la SNR de los receptores cuyo tamaño del fotodetector ha sido modificado, es decir, el CDR y el SDR. Este hecho está en concordancia con el aumento de sus pérdidas por propagación, que se traduce en una disminución de la potencia de señal recibida. Por otro lado, aunque la reducción del tamaño de los fotodetectores provoque una disminución del ruido *shot*, y también influya disminuyendo el ruido térmico, ambos ruidos sufren un incremento significativo debido a la dependencia que en función de R_b , $(R_b)^2$ y $(R_b)^3$ presenta el ruido

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

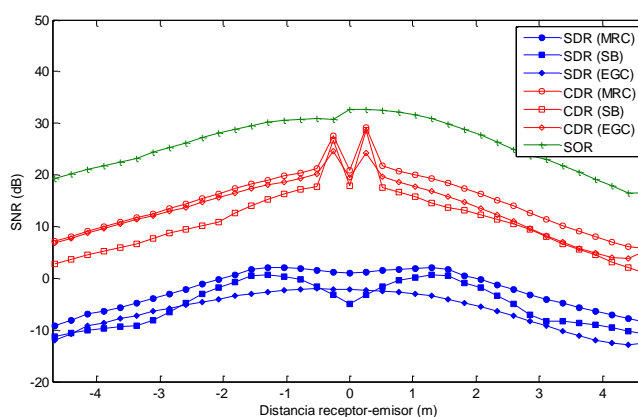


Figura 6.17. Relación señal a ruido recibida frente a la distancia receptor-emisor en función del receptor en diversidad angular y la técnica de combinación empleada. Los resultados se obtuvieron para $P_E = 600$ mW y $R_b = 50$ Mb/s.

térmico y que frente a R_b muestra el ruido *shot*, de acuerdo con las ecuaciones (6.7) y (6.1), respectivamente.

Al igual que para las pérdidas ópticas por propagación, el receptor que exhibe la mejor SNR a lo largo de la diagonal del recinto es el auto-orientable o SOR, mostrando una relación señal a ruido en recepción superior a 15 dB. Es cierto que la estructura SOR requiere del desarrollo de un sistema de orientación electromecánico que mediante un algoritmo de búsqueda sea capaz de situar su cabezal hacia la dirección donde se recibe la máxima SNR, lo que implica la necesidad de demandar una mayor capacidad computacional y mayor consumo de potencia que el receptor CDR o el SDR; sin embargo, en aplicaciones donde se requiere transmitir con altas velocidades de transmisión, como es el caso de una red WLAN, no supone una restricción a tener en cuenta para desechar su elección.

Para analizar el efecto del aumento de la tasa de bit sobre los valores de SNR conseguidos con los tres receptores en diversidad angular considerados, se ha determinado la SNR frente a la distancia del receptor respecto al emisor sobre la diagonal del recinto, en función del receptor en diversidad angular utilizado para diferentes tasas de bit, en particular para $R_b = 10$ Mb/s, 50 Mb/s y 100 Mb/s. En la Figura 6.18 se pueden observar los resultados obtenidos. Con el fin de simplificar la representación gráfica, sólo se muestra el efecto de aumentar la tasa de bit sobre los valores de la SNR obtenidos para los receptores CDR y SDR al emplear la técnica de combinación EGC, por ser la que presenta mayor sensibilidad frente a las variaciones de la posición del receptor sobre la diagonal. Para las otras dos técnicas de combinación, se representan sólo los valores de

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

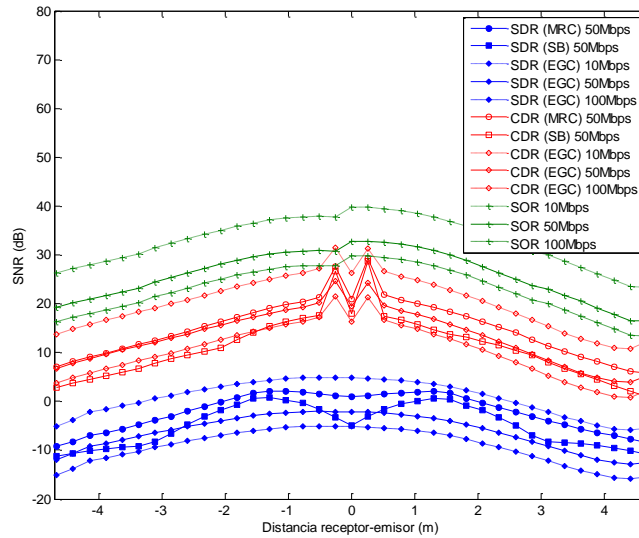


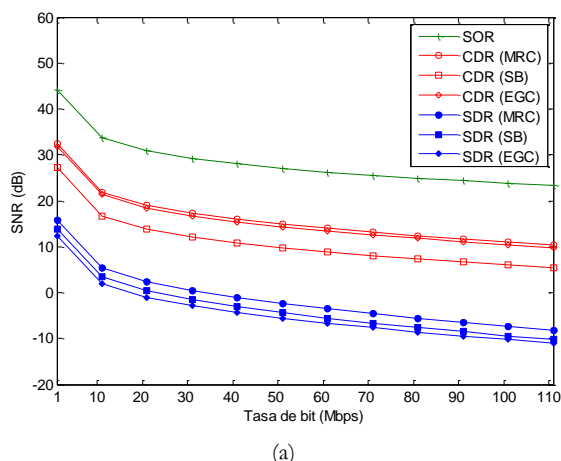
Figura 6.18. Relación señal a ruido frente a la distancia receptor-emisor sobre la diagonal en función del receptor en diversidad angular y la técnica de combinación empleada, para $P_E = 600$ mW y diferentes tasas de bit: 10 Mb/s, 50 Mb/s y 100 Mb/s.

SNR obtenidos cuando se transmite con una tasa de bit de 50 Mb/s. Como cabía esperar, los resultados muestran que, independientemente del receptor empleado, el incremento de la tasa de bit produce un empeoramiento de la SNR. Esta disminución en los valores de SNR presenta un comportamiento no lineal debido a la influencia del ruido térmico.

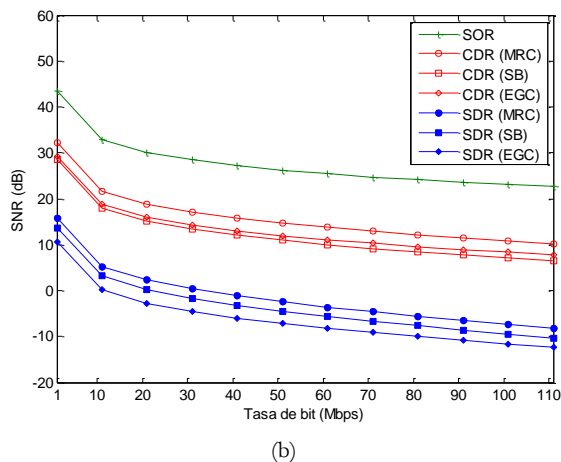
Por último, en la Figura 6.19 se muestra la relación señal a ruido frente a la tasa de bit en función del receptor en diversidad angular y la técnica de combinación empleada para dos localizaciones diferentes del receptor sobre la diagonal que atraviesa de noroeste a sureste el recinto mostrado en la Figura 6.1. Es decir, en las Figuras 6.19(a) y (b) se muestran los valores de la SNR obtenidos cuando el receptor se encuentra situado en la esquina noroeste y sureste, respectivamente. Se han escogido estas posiciones por corresponder a una zona muy afectada por la iluminación natural proveniente de las ventanas (esquina sureste), y otra muy alejada de las mismas (esquina noroeste), donde la influencia de la iluminación natural debida a la luz solar que atraviesa las ventanas es mínima.

De nuevo, el SOR es el receptor que presenta la mejor SNR para las dos posiciones simuladas, con una diferencia aproximada de 11,5 dB respecto al CDR y de 27,5 dB con el SDR, para ambos empleando la técnica de combinación MRC

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003		
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21



(a)



(b)

Figura 6.19. Relación señal a ruido frente a la tasa de bit en función del receptor en diversidad angular y la técnica de combinación empleada para dos localizaciones diferentes del receptor sobre la diagonal. (a) Esquina noroeste (alejada de las ventanas). (b) Esquina sureste (próxima a las ventanas).

y cuando la tasa de bit es de 1 Mb/s. Estas diferencias entre las tres estructuras se ven incrementadas al aumentar la tasa de bit, dado que el empeoramiento de la SNR varía en función del tipo de receptor empleado.

Por otro lado, y como cabía esperar, tanto en el receptor convencional como en el sectorizado, el esquema de combinación MRC es el que les permite alcanzar

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

los mejores resultados, seguidos de la técnica SB y EGC. Sin embargo, las técnicas MRC y SB requieren de una estimación previa de la SNR en cada elemento detector y la diferencia entre los valores de SNR obtenidos con MRC y EGC no llegan a superar los 3 dB y 5 dB para la estructura CDR y SDR, respectivamente.

Asumiendo las condiciones en las que se fundamenta la ecuación (6.20), y teniendo en cuenta que si se plantea como objetivo obtener un BER de 10^{-9} es necesario disponer de una SNR de 15,6 dB, según los resultados de SNR mostrados en las Figuras 6.19, el receptor auto-orientable permite alcanzar un BER inferior a 10^{-9} , pues presenta una SNR superior a 15,6 dB incluso para una tasa de superior a 100 Mb/s. Por otro lado, el receptor CDR consigue alcanzar dicha tasa de error de bit en enlaces que operan con una tasa de bit inferior a 40 Mb/s y 50 Mb/s dependiendo de si se emplea la técnica de combinación EGC o MRC, respectivamente. Por último, en lo que respecta a la estructura SDR, ésta garantiza un BER = 10^{-9} en enlaces con tasas de bit inferiores a 1 Mb/s, independientemente de la técnica de combinación empleada.

En definitiva, teniendo en cuenta todo lo anterior, se puede concluir que si los requerimientos de capacidad computacional y de consumo de energía no son excesivamente limitantes, en aplicaciones donde se requieren enlaces que trabajen con medias/altas velocidades de transmisión, como puede ser el caso de una red WLAN, el receptor de cabezal auto-orientable o SOR es el que mejores prestaciones exhibe en relación a la eficiencia de la potencia óptica transmitida y la relación señal a ruido. La siguiente mejor opción correspondería a utilizar el receptor CDR conjuntamente con la técnica de combinación MRC y, por último, el SDR, también con MRC.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: <http://sede.ull.es/validacion>

Identificador del documento: 866822 Código de verificación: fbsse0hw

Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

Conclusiones

Los estudios que se han venido realizando sobre los sistemas de comunicaciones ópticas no guiadas en ambientes de interior se pueden englobar básicamente en tres campos: la caracterización del canal óptico no guiado en interiores, la selección y aplicación de esquemas de codificación y modulación en sistemas ópticos de comunicación de datos no guiados, y el diseño y realización de moduladores, demoduladores, emisores y receptores. En este trabajo se abordan aspectos relacionados con el primero y el tercero de los mismos, en concreto, la resolución mediante simulación del problema de propagación de la radiación óptica no guiada en interiores y su aplicación al estudio del empleo de estructuras de recepción no formadoras de imagen con detección en diversidad angular para la interconexión de los nodos de una red de sensores infrarroja que trabaja en difusión en interiores. A continuación se enumeran las conclusiones más relevantes que pueden extraerse del presente trabajo:

1. Se ha realizado una revisión de la herramienta de simulación basada en un algoritmo de simulación MMC, fundamentado en el uso de técnicas de trazado de rayos y en el método de Monte Carlo, y del modelo de propagación existente, que utilizado conjuntamente con dicho algoritmo permite caracterizar el canal óptico no guiado en interiores.
2. El modelo de propagación hace referencia a los modelos matemáticos utilizados para aproximar el efecto de cada uno de los elementos que conforman el canal óptico no guiado en interiores: emisores, reflectores, receptores y fuentes de ruido. Disponer de un modelo de propagación que represente de forma realista los elementos que constituyen el canal es fundamental para obtener una buena caracterización. Por este motivo, se han estudiado e incorporado a la herramienta de simulación modelos matemáticos para describir el ruido *shot* derivado de las fuentes de iluminación ambiental de tipo natural y artificial, así como el ruido térmico debido a la etapa de preamplificación que comúnmente se utiliza en el detector.
3. El modelo propuesto para determinar la potencia óptica de ruido originada por la iluminación ambiental de tipo artificial procedente de las lámparas incandescentes se ha basado en los estudios realizados por J. B. Carruthers y A. M. R. Tavares, que proponen considerar a las lámparas como si fueran emisores puntuales con un perfil de radiación Lambertiano generalizado. La principal diferencia del modelo propuesto

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

respecto a los estudios realizados con anterioridad reside en la forma de determinar la potencia óptica debida a las reflexiones que sufre la iluminación en las superficies del recinto antes de alcanzar al receptor. Si bien en los modelos anteriores, se limita el cálculo a una única reflexión o se utiliza un modelo de decaimiento exponencial, en el modelo propuesto se tiene en cuenta toda la potencia debida al número de reflexiones que se desee considerar.

4. Para evaluar la potencia óptica de ruido procedente de las fuentes de iluminación natural extensas, como las ventanas y claraboyas, se ha propuesto utilizar un modelo alternativo, aplicable a algoritmos de trazado de rayos, caracterizado por presentar una mayor eficiencia computacional que el empleado con anterioridad. La principal diferencia radica en la forma de computar la potencia debida a las múltiples reflexiones que sufre la iluminación en las superficies del recinto antes de alcanzar al receptor. Mientras que para calcular la contribución de potencia debida a la iluminación directa sobre el receptor, se divide la fuente de iluminación o ventana en N_e elementos emisores, para computar la debida a las múltiples reflexiones, se propone considerar cada ventana como un único emisor desde donde se generan los rayos con una orientación aleatoria generada según el patrón de radiación de la iluminación y con una posición aleatoria distribuida uniformemente sobre su superficie. El modelo propuesto mejora computacionalmente al empleado con anterioridad en un factor aproximadamente igual a N_e , es decir, al número de elementos empleados para dividir la fuente de iluminación.
5. Se ha adaptado el modelo de propagación y algoritmo de simulación MMC, inicialmente planteados para caracterizar el canal infrarrojo en ambientes de interior, con la intención de poder estudiar aquellos enlaces donde la transmisión óptica abarca un amplio rango espectral, tal y como acontece en los sistemas VLC. En la adaptación no se ha considerado la dependencia del coeficiente de reflexión con el ángulo de incidencia de la radiación, ni tampoco los efectos de absorción óptica, fluorescencia, fosforescencia, *scattering* y dispersión cromática.
6. Además de las aportaciones relacionadas con el modelo de propagación, se han incorporado dos mejoras orientadas a facilitar el uso de la herramienta de simulación y a disminuir su tiempo de ejecución. La primera mejora proporciona la posibilidad de definir el enlace de comunicación mediante la utilización de aplicaciones gráficas de diseño 3D y obtener la respuesta al impulso del canal óptico no guiado en cualquier ambiente de interior por muy complejo que éste sea, donde coexisten distintas fuentes emisoras y dispositivos receptores en

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

presencia de fuentes de iluminación ambiental. En general, se permite emplear cualquier aplicación de diseño gráfico que ofrezca la opción de exportación a formato 3DS, elegido por ser uno de los más completos y extendidos actualmente.

7. En relación con la disminución del tiempo de cómputo de la herramienta de simulación, se han llevado a cabo dos optimizaciones basadas en mejorar el trazado o propagación de los rayos en el interior del entorno de simulación y en la paralelización del algoritmo de simulación. Para cuantificar las mejoras computacionales, se evaluó la aplicación de ambas optimizaciones sobre dos entornos de simulación diferentes: un aula vacía y un recinto con forma de prisma hexagonal con obstáculos en su interior. De los resultados obtenidos se ha podido constatar que con la primera optimización, basada en dividir el entorno de simulación en subregiones, se reduce el tiempo de cómputo en un 30% y un 50% para el primer y segundo recinto, respectivamente. Es decir, la mejora introducida sobre la propagación de los rayos permite reducir el tiempo de cómputo por encima de un 30%, porcentaje que se incrementa con la complejidad geométrica del recinto hasta aproximadamente el 50%. En cuanto a la segunda mejora computacional, basada en la paralelización del algoritmo de simulación, para ambos escenarios o entornos de simulación se ha podido constatar que llevando a cabo una distribución estática de los rayos entre los procesadores disponibles se consigue una aceleración de cómputo prácticamente proporcional al número de procesadores utilizados, verificando el supuesto inicial de que no es necesario recurrir a métodos de balanceo de carga para posibilitar un mejor aprovechamiento de los recursos de cómputo disponibles.
8. La utilización de receptores que emplean detección en diversidad angular permite obtener una mayor eficiencia en potencia, minimizar el efecto de la dispersión temporal por multipropagación y reducir el efecto debido al ruido generado por las fuentes de iluminación ambiental. En este trabajo, se ha propuesto un modelo matemático, aplicable a algoritmos de simulación de trazado de rayos, que permite caracterizar el área efectiva de detección de un receptor sectorizado en diversidad angular con forma semiesférica. La utilización del modelo conjuntamente con la herramienta de simulación propuesta ha permitido establecer la estructura óptima del receptor sectorizado que mejores prestaciones presenta en términos de la dispersión de retardo y las pérdidas ópticas por propagación. Como resultado del estudio se recomienda el uso de receptores sectorizados compuestos por dieciséis sectores distribuidos en tres coronas a razón de 4, 4 y 8 sectores, respectivamente. Los cuatro sectores de la primera corona, la más próxima a la vertical, deben tener una apertura vertical de 24° ($FOV_v = 12^\circ$), los cuatro de la segunda

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

corona, una apertura vertical de 29° ($FOV_v = 14,5^\circ$), y los ocho de la tercera corona, la más próxima a la horizontal, de 37° ($FOV_v = 18,5^\circ$). En cada corona, los sectores se distribuyen uniformemente en acimut, o dicho de otra forma, los sectores pertenecientes a una misma corona son de igual tamaño.

9. Por último, se ha realizado un estudio comparativo de las prestaciones derivadas de utilizar tres tipos de receptores no formadores de imagen en diversidad angular: el receptor sectorizado (SDR), el convencional (CDR) y el auto-orientable (SOR), como elemento detector de la radiación óptica recibida por los nodos de una red de sensores infrarroja inalámbrica que trabaja en difusión en ambientes de interior y en la que se transmite con una tasa de bit inferior a 115 kb/s. La comparación se ha llevado a cabo en términos de las mejoras obtenidas en cuanto a la dispersión de retardo, las pérdidas ópticas por propagación, la relación señal a ruido del canal y la técnica de combinación empleada: combinación por máxima relación (MRC), por igual ganancia (EGC) o mejor selección (SB). Como resultado del estudio se demuestra que el receptor convencional en diversidad angular en conjunción con la técnica de EGC es la solución que exhibe las mejores prestaciones en cuanto a la SNR obtenida, mayor eficiencia en potencia transmitida, así como menores requerimientos de capacidad computacional y consumo de energía. Es decir, dicho receptor empleando EGC es el que mejor se ajusta a las principales limitaciones que presentan los nodos de una red de sensores infrarroja que opera en difusión.
10. Aunque no era el objetivo inicialmente planteado en este trabajo, también se ha podido constatar que en aplicaciones donde se requiere la interconexión de nodos mediante enlaces ópticos de media/alta velocidad, como puede ser el caso de las redes ópticas WLAN, el receptor de cabezal auto-orientable es el que proporciona la mejor SNR y la mayor eficiencia en potencia transmitida, siempre y cuando los nodos de la red no estén excesivamente limitados en potencia y capacidad computacional.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

Líneas futuras de investigación

Durante el desarrollo del presente trabajo de Tesis, si bien han quedado algunas ideas o trabajos por desarrollar y en los que profundizar, también se han abierto algunas líneas futuras de investigación, las más destacables son:

1. Para que la caracterización mediante simulación del canal óptico no guiado en interiores adquiera utilidad práctica, es necesario disponer de un modelo de propagación que represente de manera realista a los elementos que constituyen el canal: emisores, materiales o superficies de reflexión, receptores y fuentes de ruido. En este sentido, queda pendiente incorporar en la herramienta de simulación modelos de reflexión que aproximen lo máximo posible el comportamiento real de las superficies de reflexión, como el de Blinn-Phong o el de Lafortune [Rufo15]. En particular para el canal VLC, aunque ya existen algunos trabajos de investigación publicados, es necesario profundizar en el modelado de efectos o fenómenos como la absorción óptica, la fluorescencia y fosforescencia, el esparcimiento óptico o *scattering* y la dispersión cromática.
2. En relación con el modelado del ruido derivado de las fuentes de iluminación ambiental, en concreto con las de tipo artificial, además de modelar las lámparas incandescentes, es inevitable plantearse la necesidad de incluir otro tipo de luminarias presentes en el mercado, como las fluorescentes, las de bajo consumo y las lámparas LED, cuya comercialización se ha acentuado de manera considerable en estos últimos años y que han sido las causantes del gran auge de los sistemas VLC.
3. Al igual que ocurre con los receptores, con la idea de obtener una mayor eficiencia en potencia y minimizar el efecto de la dispersión temporal debida a la multipropagación, se suelen emplear transmisores que emplean múltiples lóbulos de emisión, también denominados transmisores o emisores multihaz. En este sentido, una posibilidad podría consistir en evaluar la mejora de las prestaciones resultantes de emplear conjuntamente transmisión y recepción en diversidad angular no sólo en el campo de las redes de sensores ópticas, sino también en otros sistemas que operan a baja velocidad orientados al desarrollo de aplicaciones de localización o posicionamiento, ya sea mediante enlaces infrarrojos o VLC, es decir, en sistemas que de manera automática permiten determinar la posición de un elemento móvil.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

4. Sería conveniente incluir nuevos modelos que permitan abordar el estudio de otro tipo de formas de detección en diversidad angular, como los receptores formadores de imagen basados en matrices o *arrays* de fotodetectores. De esta forma, además de poder analizar su utilización en la interconexión de sensores mediante enlaces ópticos no guiados, se abre un nuevo campo centrado en el estudio de sistemas de comunicaciones inalámbricos basados en luz visible caracterizados por utilizar cámaras o sensores formadores de imagen como elemento receptor (OCC, *Optical Camera Communications*), los cuales presentan oportunidades de uso en sistemas inteligentes de transporte, de localización y de realidad aumentada.
5. Una de las líneas futuras abiertas, en colaboración con el grupo de investigación del Dr. Pérez Jiménez de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria y con el laboratorio de Ingeniería Biométrica coordinado por el Dr. Rodríguez Ramos, perteneciente a esta universidad, se fundamenta en el empleo de cámaras plenópticas como elemento receptor de un sistema OCC. La principal ventaja que presentan las cámaras plenópticas es que, a diferencia de las convencionales, permiten conocer además de la cantidad de luz, su dirección de incidencia. En definitiva, se dispondría de un sistema OCC equipado con un receptor con una mayor capacidad de multiplexación o diversidad espacial.
6. Por último, otro campo de investigación a explorar se centra en evaluar diferentes técnicas de modulación, procesado y equalización, aplicables a los sistemas anteriormente mencionados caracterizados por emplear transmisión y recepción en diversidad angular o espacial, atendiendo a la aplicación para la cual se ha desarrollado el sistema de comunicación. En este sentido, hay que destacar los trabajos que sobre la aplicación de técnicas de modulación en el canal IR y VLC han sido desarrollados por algunos miembros pertenecientes al grupo de investigación en el que se ha realizado este trabajo de Tesis y al resto de grupos con los que se colabora.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

Bibliografía

- [Acampora99] A.S. Acampora, S.V. Krishnamurthy, “A broadband wireless access network based on mesh-connected free-space optical links”, *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no. 5, pp. 62-65, October 1999.
- [Agrawal14] Agrawal, N.; Davis, C.; Milner, S. “Design and performance of a directional media access control protocol for optical wireless sensor networks”. *IEEE J. Opt. Commun. Netw.* 2014, vol. 6, pp. 215–224. 2014.
- [Akhavan00a] K. Akhavan, M. Kavehrad, S. Jivkova, “Adaptive-rate code combining for wireless infrared communications systems employing direction diversity”, *MILCOM 2000, 21st Century Military Communications Conference Proceedings*, vol. 1, pp. 75-79, 2000.
- [Akhavan00b] K. Akhavan, M. Kavehrad, S. Jivkova, “Wireless infrared in-house communications: how to achieve very high bit rates”, *WCNC 2000, IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, vol. 2, pp. 698-703, 2000.
- [Akhavan02a] K. Akhavan, M. Kavehrad, S. Jivkova, “High-speed power-efficient indoor wireless infrared communication using code combining - Part I”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 7, pp. 1098-1109, July 2002.
- [Akhavan02b] K. Akhavan, M. Kavehrad, S. Jivkova, “High-speed power-efficient indoor wireless infrared communication using code combining - Part II”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 9, pp. 1495-1502, Sep. 2002.
- [Akyildiz02] Akyildiz, I.F.; Su, W.; Sankarasubramaniam, Y.; Cayirci, E. “A survey on sensor networks”. *IEEE Commun. Mag.* 2002, vol. 40, pp. 102–114. 2002.
- [Alexander97] S.B. Alexander, “*Optical Communication Receiver Design*”, The International Society for Optical Engineering (SPIE) & The Institution of Electrical Engineers (IEE), 1997.
- [Al-Ghamdi03] A. G. Al-Ghamdi and J. M. H. Elmirghani, “Optimization of a triangular PFDR antenna in a fully diffuse OW system influenced by background noise and multipath

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- propagation”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, no. 12, pp. 2103–2114, Dec. 2003.
- [Al-Ghamdi04a] A. G. Al-Ghamdi and J. M. H. Elmirghani, “Line Strip Spot-diffusing transmitter configuration for optical wireless systems influenced by background noise and multipath dispersion”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 52, no. 1, pp. 37-45, January 2004.
- [Al-Ghamdi04b] A. G. Al-Ghamdi and J. M. H. Elmirghani, “Analysis of diffuse optical wireless channels employing spot-diffusing techniques, diversity receivers, and combining schemes”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 52, no. 10, pp. 1622-1631, October 2004.
- [Alves00a] L. Alves, R. Aguiar, E. de Vasconcelos, and J. Cura, “A sectored receiver for infrared wireless networks,” *IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Geneva*, pp. 429-432, May 2000.
- [Alves00b] L. Alves, J.L: Cura, R.L: Aguiar, and D.M. Santos, “An eight-sector wireless infrared receiver”, *ICECS 2000. The 7th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, Jounieh*, vol.1, pp. 49-52, December 2000.
- [ANSI07] American National Standards Institute; “*ANSI Z136.1-Safe Use of Lasers*”, 2007.
- [Armstrong13] J. Armstrong, Y. Sekercioglu, and A. Neild, “Visible light positioning: a roadmap for international standardization,” *IEEE Communications Magazine*, vol.: 51, issue: 12, pp.:68–73, December 2013.
- [Audeh95] M.D. Audeh, J.M. Kahn, “Performance evaluation of baseband OOK for wireless indoor infrared LANs operating at 100 Mb/s”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 43, no. 6, June 1995.
- [Audeh96] M.D. Audeh, J.M. Kahn, J.R. Barry, “Performance of PPM on measured non-directed indoor infrared channels”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 44, no. 6, pp. 654-659, June 1996.
- [Baldrige09] AM Baldrige, SJ Hook, CI Grove, G Rivera, *The ASTER spectral library version 2.0*. Remote Sens. Environ 113, 711–715, (2009). doi:10.1016/j.rse.2008.11.007.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	Fecha:
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- [Barry90] J.R. Barry, E.A. Lee, "Performance of coherent optical receivers", *Proceedings of the IEEE*, vol. 78, no. 8, Aug. 1990.
- [Barry91] J.R. Barry, J.M. Kahn, E.A. Lee, D.G. Messerschmitt, "High-speed nondirectional communications for wireless networks", *IEEE Networks Magazine*, pp. 44-53, Nov. 1991.
- [Barry93] J.R. Barry, J. M. Kahn, W.J. Krause, E. A. Lee, and D. G. Messerschmitt, "Simulation of multipath impulse response for wireless optical channels", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 11, no. 3, pp. 367-379, April 1993.
- [Barry94] J.R. Barry, "Wireless infrared communications", Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [Bo12] Bo Bai, Qunfeng He, Zhengyuan Xu, Yangyu Fan, "The color shift key modulation with non-uniform signaling for visible light communication" *IEEE International Conference on Communications in China (ICCC)*, pp: 37- 42, 2012.
- [Boucouvalas96] A. C. Boucouvalas, "Indoor ambient light noise and its effect on wireless optical links", *Proc. IEE Optoelectron.*, vol. 143, no. 6, pp. 334-338, December 1996.
- [Carruthers00] J. B. Carruthers and J. Kahn, "Angle diversity for nondirected wireless infrared communication", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, no. 6, pp. 960-969, June 2000.
- [Carruthers96] J.B. Carruthers, J.M. Kahn, "Multiple-subcarrier modulation for nondirected wireless infrared communication", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 3, pp. 538-546, April 1996.
- [Carruthers97] J. B. Carruthers and J. Kahn, "Modeling of Nondirected wireless infrared channels", *IEEE Transaction on Communications*, vol. 45, no. 10, pp. 1260-1268, Oct. 1997.
- [Castillo-Vázquez03] M. Castillo-Vázquez, A. Puerta-Notario, "Self-orienting receiver for indoor wireless infrared links at high bit rates", *Proceedings of the 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC 2003-Spring)*, vol.3, pp.1600-1604, Orlando 22-25, April 2003.
- [Castillo-Vázquez04] M. Castillo-Vázquez, A. García-Zambrana and A. Puerta-Notario, "Self-orienting receiver using rate-adaptive

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- transmission based on OOK formats with memory for optical wireless communications”, *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'04)*, vol. 2, 29, pp. 1225–1229, Dallas, USA, 29 November–3 December 2004.
- [Chan96] H.-H. Chan, J.M.H. Elmirghani, R.A. Cryan, “An equalization technique for indoor IR wireless LANs”, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 10, no. 4, pp. 235-238, Nov. 1996.
- [Chan98] H.-H. Chan, K.L. Sterckx, J.M.H. Elmirghani, R.A. Cryan, “Performance of optical wireless OOK and PPM systems under the constraints of ambient noise and multipath dispersion”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 12, pp. 83-87, Dec. 1998.
- [Chau10] J. C. Chau, K. Matarese, T. D. C. Little, “IP- Enabled LED Lighting Supporting Indoor Mobile and Wireless Communications” *8th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications and Services*, 2010.
- [Chayat93a] N. Chayat, M. Rothenberg, “Simulation results for several WLAN modulation methods”, *Doc. IEEE P802.11-93/135*.
- [Chayat93b] N. Chayat, “Considerations in FSK Tx pulse shaping and Rx filtering for low ISI at high bit rates”, *Doc. P802.11-93/160*.
- [Chen91] K.C. Chen, “On-off keying optical transmission and channel capacity for indoor high rate wireless data networks”, *GLOBECOM'91, IEEE Global Telecommunications Conference*, pp. 1331-1335, 1991.
- [Chen92] K.C. Chen, C.H. Lee, “Capture in multiple access lightwave networks employing direct detect modulations”, *GLOBECOM'92, IEEE Global Telecommunications Conference*, pp. 1344-1348, 1992.
- [Chen94a] K.C. Chen, T.C. Wu, “A proposed diffused infrared PHY structure”, *Doc. IEEE P802.11-94/80*.
- [Chen94b] K.C. Chen, H.K. Lu, T.H. Tsaur, “Template parameters of 4-ary PPM IR-PHY”, *Doc. IEEE P802.11-94/126*.
- [Chen94c] K.C. Chen, “Direct detect modulations of high speed indoor diffuse infrared wireless transmission”, *PIMRC'94*,

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	Fecha:
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 4, pp. 1096-1100, Sep. 1994.
- [Chowdhury14] M. Chowdhury, W. Zhang, and M. Kavehrad, "Combined deterministic and modified Monte Carlo method for calculating impulse responses of indoor optical wireless channels," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 18, pp. 3132–3148, September 2014.
- [Craford92] M. Craford, "Leds challenge the incandescents", *IEEE Circuits and Devices Magazine*, vol. 8, pp. 24-29, 1992.
- [Cui09] K. Cui, G. Chen, Q. He, Z. Xu; "Indoor optical wireless communication by ultraviolet and visible light", *Proc. Of SPIE*, vol. 7464, 74640D, 2009.
- [Danaher04] S. Danaher. "*Digital 3D Design*". Course Technology PTR, 2004.
- [DelCampo16] Guillermo Del Campo-Jimenez, , Franciso Jose Lopez-Hernandez, and Rafael Perez-Jimenez. "Modulation schemes effect on the driver efficiency and the global VLC transmitter energy consumption." *Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), 2016 10th International Symposium on. IEEE*, 2016.
- [Delgado00] F. Delgado, R. Pérez-Jiménez, J.A. Rabadán, F.J. López-Hernández, "Design of a fast frequency-hopping spread-spectrum system for wireless infrared communications", *Electronics Letters*, vol. 36, no. 17, pp. 1510-1512, Aug. 2000.
- [Delgado02] F. Delgado, R. Pérez-Jiménez, J.A. Rabadán, M.A. Bacallado, F.J. López-Hernández, "Experimental characterization of a low-cost fast frequency-hopping spread-spectrum system for wireless in-house optical communications", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 48, no. 1, pp. 10-16, Feb. 2002.
- [Delgado03] F. Delgado Rajó, "*Contribución al Estudio de las Comunicaciones Ópticas Difusas en Interiores Mediante Señales de Espectro Ensanchado por Salto en Frecuencia*", Tesis Doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2003.
- [Delgado04] F. Delgado, J.A. Rabadán, S. Pérez, R. Pérez-Jiménez, "FHSS transceiver over wireless indoor optical channels", PIMRC 2004, *IEEE International Symposium on Personal,*

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 3, pp. 1568-1573, Sep. 2004.
- [Delgado14] F. Delgado-Rajó; V. Guerra-Yanez; J. Rabadán; J. Rufo; R. Pérez-Jiménez. “Color Shift Keying Communication System with a Modified PPM Synchronization Scheme”. *IEEE Photonics Technology Letters*. vol: 26, no: 18, pp: 1851-1854. Sep. 2014.
- [Djahani00] P. Djahani, and J.M. Kahn, “Analysis of infrared wireless links employing multibeam transmitters and imaging diversity receivers”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 48, no. 12, pp. 2077-2088, December 2000.
- [Dominguez97] M. Domínguez Somonte and M. M. Espinosa Escudero. “*Diseño Asistido. Campos De Aplicación*”. Publicaciones UNED, 1997.
- [Drost10] Drost R.J., Sadler B.M., “Constellation design for color-shift keying using billiards algorithms”. *IEEE GLOBECOM 2010*, pp: 980-984, 2010.
- [Elgala09] H. Elgala, R. Mesleh, H. Haas; “Indoor broadcasting via white LEDs and OFDM”; *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 55, no. 3, pp. 1127-1134, 2009.
- [Elgala11] Elgala, Hany, Raed Mesleh, and Harald Haas. “Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art.” *IEEE Communications Magazine* 49.9 (2011).
- [Elmirghani95] J.M.H. Elmirghani, R.A. Cryan, “Hybrid PPM-CDMA systems utilizing optical orthogonal codes for indoor wireless infrared communication”, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 8, no. 1, pp. 44-47, Jan. 1995.
- [Elmirghani97] J.M.H. Elmirghani, “Performance of optical wireless systems based on PPM and PIN-BJT receivers”, *Journal of Optical Communications*, vol. 18, no. 6, pp. 208-212, Dec. 1997.
- [Gancarz13] J. Gancarz, H. Elgala, and T. D.C. Little, “Impact of Lighting Requirements on VLC Systems,” *IEEE Communications Magazine*, vol.51, issue: 12, pp.:34–41, December 2013.
- [García-Zambrana01] A. García-Zambrana, A. Puerta-Notario, “Large change infrared links rate-adaptive indoor wireless using variable

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

silence periods”, *Electronics Letters*, vol. 37, no. 8, pp. 524-525, April 2001.

- [García-Zambrana03] A. García-Zambrana, A. Puerta-Notario, “Novel approach for increasing the peak-to-average optical power ratio in rate-adaptive optical wireless communication systems”, *IEE Proceedings-Optoelectronics*, vol. 150, no. 5, pp. 439-444, Oct. 2003.
- [García-Zambrana99] A. Garcia-Zambrana, A. Puerta-Notario, “RZ-Gaussian pulses reduce the receiver complexity in wireless infrared links at high bit rates”, *Electronics Letters*, vol. 35, no. 13, pp.1059-1061, 24th June 1999.
- [Garrido-Balsells05] J. M. Garrido-Balsells, A. García-Zambrana, A. Puerta-Notario, “Rate-adaptive transmission schemes in the context of runlength-limited codes for optical wireless communications”, *IEEE Communications Letters*, vol. 9, iss. 9, pp. 787- 789, 2005.
- [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, November 1979.
- [Gfeller96] F. Gfeller, W. Hirt, M. de Lange and B. Weiss, “Wireless infrared transmission: How to reach all office space”, *Proceeding IEEE Vehic. Technol. Conf.*, pp. 1535-1539, April 1996.
- [Ghassemlooy12] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari. “*Optical wireless communications*”. CRC Press, ISBN-13: 978-1-4398-5235-4, 2012.
- [Ghassemlooy98] Z. Ghassemlooy, A.R. Hayes, N.L. Seed, E.D. Kaluarachi, “Digital pulse interval modulation for optical communications”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 12, pp. 95-99, Dec. 1998.
- [Giner01] J. Giner, C. Militello, A. García, “The Monte Carlo method to determine the error in calculation of objective acoustic parameters within the raytracing technique”, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 110, no. 6, pp. 3081-3085, Dec. 2001.
- [Giner99] J. Giner, C. Militello, A. García, “Ascertaining confidence within the ray-tracing technique”, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 106, no. 2, pp. 816-822, Aug. 1999.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
866822	fbse0hw	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- [Goell74a] J.E. Goell, "Input amplifiers for optical PCM receivers", *Bell Systems Technology Journal*, vol. 53, no. 9, pp. 1771-1793, 1974.
- [Goell74b] J.E. Goell, "An optical repeater with high-impedance input amplifiers", *Bell Systems Technology Journal*, vol. 53, no. 4, pp. 629-643, 1974.
- [Goldberg95] L. Goldberg, "Infrared data transmission: the missing link", *Electronic Design*, pp. 47-64, April 1995.
- [González02a] O. González, C. Militello, S. Rodríguez, R. Pérez-Jiménez, A. Ayala, "Error estimation of the impulse response on diffuse wireless infrared indoor channels using a Monte Carlo ray-tracing algorithm", *IEE Proceedings of Optoelectronic*, vol. 149, no. 5/6, October/December 2002.
- [González02b] O. González, C. Militello, S. Rodríguez, R. Pérez-Jiménez, A. Ayala, "Estimación del error en el cálculo de la respuesta impulsiva del canal IR mediante algoritmos de trazado de rayos basados en el método de Monte Carlo", *URSI 2002, XVII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio*, pp. 325-326, Septiembre 2002.
- [González05a] O. González, S. Rodríguez, R. Pérez-Jiménez, 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 Transactions on Communications*, vol. 53, no. 1, January 2005.
- [González05b] O. González, "Estudio de la aplicación de técnicas de modulación OFDM para comunicaciones ópticas guiadas en el canal infrarrojo", Tesis Doctoral, Universidad de La Laguna, 2005.
- [González05c] O. González, R. Pérez-Jiménez, S. Rodríguez, J. Rabadán, A. Ayala, "OFDM over the indoor wireless optical channel", *IEE Proceedings Optoelectronics*, vol. 152, iss. 4, pp. 199-204, 2005.
- [González11] O. González, S. Rodríguez, R. Pérez-Jiménez, B.R. Mendoza, A. Ayala, "Comparison of Monte Carlo ray-tracing and photon-tracing methods for calculation of the impulse response on indoor wireless optical channels", *Optics Express*, vol. 19, no. 3, January 2011.
- [González15] O. González, J.A. Martín-González, M.F. Guerra-Medina, F. J. López-Hernández and F.A. Delgado-Rajó, "Cyclic code-shift extension keying for multi-user optical wireless

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- communications”, *IET Electronics Letters*, vol. 51, no. 11, pp. 847-849, May 2015.
- [Grobe13] L. Grobe, A. Paraskevopoulos, J. Hilt, and D. Schulz, “High-Speed Visible Light Communication Systems,” *IEEE Communications Magazine*, vol.: 51, issue: 12, pp.:60–66, December 2013.
- [Grubor05] J. Grubor, V. Jungnickel, K. Langer, and C. von Helmolt, “Dynamic Data-rate Adaptive Signal Processing Method in a Wireless Infrared Data Transfer System,” *Patent DE102 005 030 299, EP1 897 252, WO2 006 136 126, US11/993, 270, 24 June, 2005.*
- [Grubor08] J. Grubor, S. Randel, K.-D. Langer, and J. Walewski, “Broadband Information Broadcasting Using LED-Based Interior Lighting,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 24, pp. 3883–3892, Dec 2008.
- [Hajjarian09] Z. Hajjarian, M. Kavehrad, J. Fadlullah; “Analysis of Wireless Optical Communications Feasibility in Presence of Clouds Using Markov Chains”; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 27, n. 9, pp. 1526 - 1534, 2009.
- [Hashemi93a] H. Hashemi, “The indoor radio propagation channel”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 81, no. 7, pp. 943-968, July 1993.
- [Hashemi93b] H. Hashemi, “Impulse response modelling of indoor radio propagation channel”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 11, no. 7, pp. 967-978, Sep. 1993.
- [Hashemi94a] H. Hashemi, G. Yun, M. Kavehrad, F. Behbahani, P.A. Galko, “Indoor propagation measurement at infrared frequencies for wireless local area networks applications”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 43, pp. 562-575, Aug. 1994.
- [Hashemi94b] H. Hashemi, G. Yun, M. Kavehrad, F. Behbadani, “Frequency response measurements of the wireless indoor channel at infrared frequencies”, *SUPERCOMM/ICC’94, IEEE International Conference on Communications*, pp. 1511-1515, May 1994.
- [Ho95] K.-P. Ho and J.M. Kahn, “Compound Parabolic Concentrators for Narrow-Band Wireless Infrared

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- Receivers”, *Optical Engineering*, vol. 34, no. 5, pp. 1385-1395, May 1995.
- [Hollenhorst95] J.N. Hollenhorst, “Fundamental limits on optical pulse detection and digital communication”, *Journal of Lightwave Technology*, vol 13, no. 6, June 1995.
- [Hranilovic99] S. Hranilovic, D.A. Johns, “A multilevel modulation scheme for high-speed wireless infrared communications”, *ISCAS’99, IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, vol. 6, pp. 338-341, June 1999.
- [Hullet81] J.L. Hullet, S. Moustakas, “Optimum transimpedance broadband optical preamplifier design”, *Optical & Quantum Electronics*, vol. 13, pp. 65-69, 1981.
- [IEC07] IEC 60825-1; “Safety of laser products- Part 1: Equipment classification and requirements”; *International Electrotechnical Commission*, 2007.
- [IEEE 802.11] IEEE Std. 802.11, *IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications* (includes IEEE Std. 802.11, 1999 Edition; IEEE Std. 802.11A.-1999; IEEE Std. 802.11B.-1999; IEEE Std. 802.11B.-1999/Cor 1-2001; and IEEE Std. 802.11D.-2001). ISO/IEC 8802 11:2005(E), 2003 Edition.
- [IEEE 802.15.7-2011] IEEE Std. 802.15.7, *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light*, pp. 1-309, Sept. 2011.
- [Iwasaki08] S. Iwasaki, C. Premachandra, T. Endo, T. Fujii, M. Tanimoto, Y. Kimura; “Visible Light Road-to-Vehicle Communication Using High-Speed Camera”; *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 13 - 18, 2008.
- [JEITA_STD] Standards JEITA: ‘CP-1221 Visible Light Communications System’ and JEITA: ‘CP-1222 Visible Light ID System’, 2007.
- [Jeong14] Jin-Doo Jeong, et al. “A Novel Architecture for Efficient Implementation of Dimmable VPPM in VLC Lightings”. *ETRI Journal*, vol. 36, no. 6, pp. 905-912, December 2014.
- [Jivkova00] S.T. Jivkova and M. Kavehrad, “Multispot diffusing configuration for wireless infrared access”, *IEEE*

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- Transactions on Communications*, vol. 48, no. 6, pp. 970-978, June 2000.
- [Jivkova01] S.T. Jivkova and M. Kavehrad, "Receiver designs and channel characterization for multi-spot high-bit-rate wireless infrared communications", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 49, no. 12, pp. 2145-2153, December 2001.
- [Jivkova04] S.T. Jivkova, B.A. Hristov, M. Kavehrad, "Power-efficient multispot-diffuse multiple-input-multiple-output approach to broad-band optical wireless communications", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 53, no. 3, pp. 882-889, May 2004.
- [Jovicic13] A. Jovicic, J. Li, and T. Richardson, "Visible Light Communication: Opportunities, Challenges and the Path to Market," *IEEE Communications Magazine*, vol.:51, issue: 12, pp.: 26 – 32, December 2013.
- [Jungnickel02] V. Jungnickel, V. Pohl, S. Nonnig, and C. Von Helmolt, "A Physical Model of the Wireless Infrared Communication Channel," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 3, pp. 631–640, April 2002.
- [Jungnickel15] V. Jungnickel, M. Uysal, N. Serafimovski, T. Baykas, D. O'Brien, E. Ciaramella, Z. Ghassemlooy, R. Green, H. Haas, P. A. Haigh, V. P. Gil Jimenez, F. Miramirkhani, M. Wolf, S. Zvánovec, "A European View on the Next Generation Optical Wireless Communication Standard", *IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, Tokyo, Japan, 28-30 October 2015.
- [Jurado-Navas11] A. Jurado-Navas, J. M. Garrido Balsells, J. F. París, M. Castillo-Vázquez, A. Puerta-Notario, "General analytical expressions for the bit error rate of atmospheric optical communication systems", *Optics Letters*, vol. 36, iss. 20, pp. 4095-4097, 2011.
- [Kahn94] J.M. Kahn, J.R. Barry, M.D. Audeh, J.B. Carruthers, W.J. Krause, G.W. Marsh, "Non-directed infrared links for high-capacity wireless LANs", *IEEE Personal Communications*, pp. 12-25, 2nd Quarter, 1994.
- [Kahn95] J.M. Kahn, W.J. Krause, J.B. Carruthers, "Experimental characterization of non-directed indoor infrared

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- channels”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 43, no. 2/3/4, pp. 1613-1623, Feb./March/April 1995.
- [Kahn97] J. M. Kahn and J. R. Barry, “Wireless infrared communications,” *Proc. IEEE*, vol. 85, pp. 265–298, Feb. 1997.
- [Kahn98] J.M. Kahn, P. Djahani, A.G. Weisbin, K.T. Beh, A.P. Tang, R. You, “Imaging diversity receivers for high-speed infrared wireless communication”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 12, pp. 88-94, Dec. 1998.
- [Kato93] S. Kato, S. Kubota, K. Seki, T. Sakata, K. Kobayashi, Y. Matsumoto, “Implementation architecture, suggested preamplifiers and study, VLSI components for standard 1 Mbps GFSK and for higher bit rate FQPSK, OQPSK WLAN”, *Doc. IEEE P802.11-93/137*.
- [Kavehrad03] M. Kavehrad, S. Jivkova, “Indoor broadband optical wireless communications: optical subsystems designs and their impact on channel characteristics”, *IEEE Wireless Communications*, vol. 10, no. 2, pp. 30-35, April 2003.
- [Keiser00] G. Keiser, “*Optical Fiber Communications*”, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [Khalid12] A. M. Khalid, G. Cossu, R. Corsini, P. Choudhury, E. Ciaramella. “1-Gb/s Transmission Over a Phosphorescent White LED by Using Rate-Adaptive Discrete Multitone Modulation”. *IEEE Photonics Journal*. vol. 4, n. 5, October 2012.
- [Komine04] T. Komine, M. Nakagawa, “Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights”, *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 50, no. 1, pp. 100-107, 2004.
- [Langer07] K.D. Langer, J. Grubor, “Recent developments in optical wireless communications using infrared and visible light”, *Proceeding of 9th Int. Conf. on Transparent Optical Networks*, vol. 3, pp. 146–15, 1–5 July 2007.
- [Langer09] K.D. Langer, J. Vucic, C. Kottke, L.F. del Rosal, S. Nerretter, J. Walewski, “Advances and prospects in high-speed information broadcast using phosphorescent white-light LEDs”, *Proceeding of 11th Int. Conf. on Transparent Optical Networks*, pp. 1-6, 2009.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- [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, February 2011. doi:10.1109/lcomm.2011.010411.10194.
- [Lee11b] K. Lee, H. Park, "Modulations for visible light communications with dimming control", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 16, pp. 1136-1138, Aug. 2011.
- [Lee99] D.C. Lee, J.M. Kahn, "Coding and equalization for PPM on wireless infrared channels", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 47, no. 2, pp. 255-260, Feb. 1999.
- [Lib3ds] lib3ds software library version 2.0
- [Little08] T. D. C. Little, P. Dib, K. Shah, N. Barraford, B. Gallagher; "Using LED Lighting for Ubiquitous Indoor Wireless Networking"; *IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, pp. 373 - 378, Francia, 2008.
- [Lomba95] Lomba, C.R.A.T., Valadas, R.T., and de Oliveira Duarte, A.M. "Sectored receivers to combat the multipath dispersion of the indoor optical channel". PIMRC'95 – *Sixth IEEE Int. Symp. Personal, Indoor and Mobile Communications*, 1995, vol. 6, pp. 321–325.
- [Lomba98] C.R. Lomba, R.T. Valadas, A.M. de Oliveira Duarte, "Experimental characterisation and modelling of the reflection of infrared signals on indoor surfaces", *IEE Proceedings-Optoelectronics*, vol. 145, no. 3, pp. 191 - 197, June 1998.
- [López88] M. López, "*Fundamentos y Métodos de Estadística*", Ediciones Pirámide, Madrid, 1988.
- [López-Hernández00] F. J. López-Hernández, R. Pérez-Jiménez, and A. Santamaría, "Ray-Tracing Algorithms for Fast Calculation of the Channel Impulse Response on Diffuse IR-Wireless Indoor Channels", *SPIE Opt. Eng.*, vol.39, no. 10, pp. 1510-1512, 2000.
- [López-Hernández11] F. J. Lopez-Hernandez, G. Campo-Jimenez, E. Poves, J. A. Martin-Gonzalez, "LED jitter induced limitation effects in the baud rate of VLC systems", *IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)* 2011, pp. 39-40, 2011.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fsbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- [López-Hernández97] F.J. López-Hernández, M.J. Betancor, “DUSTIN: a Novel Algorithm for the Calculation of the Impulse Response on IR Wireless Indoor Channels”, *IEE Electronic Letters*, vol. 33, no. 21, pp. 1804-1806, October 1997.
- [López-Hernández98a] F.J. López-Hernández, R. Pérez-Jiménez and A. Santamaría, “Monte Carlo calculation of impulse response on diffuse IR wireless indoor channels”, *IEE Electronic Letters*, vol. 34, no. 12, pp. 1260-1262, June 1998.
- [López-Hernández98b] F. J. López-Hernández, R. Pérez-Jiménez and A. Santamaría, “Modified Monte Carlo scheme for high-efficiency simulation of the impulse response on diffuse IR wireless indoor channel”, *IEE Electronic Letters*, vol. 34, no. 19, pp. 1819-1821, September 1998.
- [Luna-Rivera14] J.M. Luna-Rivera, R. Pérez-Jiménez, J. Rabadán-Borjes, J. Rufo-Torres, V. Guerra, y C. Suárez-Rodríguez, “Multiuser CSK scheme for indoor Visible Light Communication”. *Optics Express*, Vol. 22, Issue 20, pp. 24256-24267, October 2014.
- [Martín-González09] J. A. Martín-Gonzalez, E. Poves, F. J. Lopez-Hernandez; “Random optical codes used in optical networks”; *IET Communications*, vol. 3, iss. 8, pp. 1392 - 1401, 2009.
- [Matsumoto08] Y. Matsumoto, T. Hara, Y. Kimura; “CMOS photo-transistor array detection system for visual light identification (ID)”; *5th International Conference on Networked Sensing Systems (INSS 2008)*, pp. 99 - 102, 2008.
- [McCullagh94a] M.J. McCullagh, D.R. Wisely, “155 Mb/s optical wireless link using a bootstrapped silicon APD receiver”, *Electronics Letters*, vol. 30, no. 5, pp. 430-431, March 1994.
- [McCullagh94b] M.J. McCullagh, “A 50 Mb/s optical wireless LAN link using novel optical and electronic technologies”, *International Zürich Seminar on Digital Communications*, March 1994.
- [Melián97] V.M. Melián Santana, “*Contribución al Estudio del Diseño de Equipos Terminales para Redes de Datos Mediante Comunicaciones Ópticas No Guiadas*”, Tesis Doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 1997.
- [Mendoza04] B. R. Mendoza, S. Rodríguez, R. Pérez-Jiménez, A. Ayala, O. González, “Modelo de receptor sectorizado para la simulación del canal óptico no guiado en interiores”,

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- URSI 2004, *XIX Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio*, Septiembre 2004.
- [Mendoza05] B. R. Mendoza, S. Rodríguez, R. Pérez-Jiménez, O. González, A. Ayala, "Sectorized receivers model for calculation of the impulse response on IR wireless indoor channels using Monte Carlo based ray-tracing algorithm", *SPIE 2005, The international Society for Optical Engineering*, vol. 5837, May 2005.
- [Mendoza07] B. R. Mendoza, S. Rodríguez, R. Pérez-Jiménez, O. González, E. Poves, "Considerations on the design of sectorized receivers for wireless optical channels using a Monte Carlo based ray tracing algorithm", *IET Optoelectron.*, vol. 1, no. 5, pp. 226-232, 2007.
- [Mendoza16] B. R. Mendoza, S. Rodríguez, R. Pérez-Jiménez, A. Ayala, O. González, "Comparison of three non-imaging angle-diversity receivers as input sensors of nodes for indoor infrared wireless sensor networks: theory and simulation", *Sensors 2016*, vol. 16, Issue 7, no. 1086, pp. 1-18, doi: 10.3390/s16071086, July 2016.
- [Mesleh11] R. Mesleh, H. Elgala, H. Haas, "Optical Spatial Modulation", *Journal Optical Communication Network*, vol. 3, no. 3, March 2011.
- [Minh09] H. Le Minh, D. O'Brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung, Y. Oh, E. Won; "100-Mb/s NRZ Visible Light Communications Using a Postequalized White LED"; *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, iss. 15, pp. 1063-1065, 2009.
- [Miramirkhani15] Miramirkhani, Farshad, and Murat Uysal. "Channel modeling and characterization for visible light communications". *IEEE Photonics Journal* 7.6 (2015): 1-16.
- [Monteiro12] Monteiro E., Hranilovic S., "Constellation design for color-shift keying using interior point methods" *IEEE Globecom 2012*, pp: 1224-1228, 2012.
- [Moreira93] A. Moreira, C. Lomba, R. Aguiar, R. Valadas, A.M. de Oliveira Duarte, "Infrared modulation method: 16-PPM", *Doc. IEEE P802.11-93/154*.
- [Moreira94a] A. Moreira, C. Lomba, R. Aguiar, R. Valadas, A.M. de Oliveira Duarte, "IR-PHY template", *Doc. IEEE P802.11-94/95*.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- [Moreira94b] A. Moreira, C. Lomba, R. Aguiar, R. Valadas, A.M. de Oliveira Duarte, "IR-PHY proposal", *Doc. IEEE P802.11-94/96*.
- [Moreira94c] A. Moreira, A.F. Sousa, R. Aguiar, R. Valadas, A.M. de Oliveira Duarte, "Performance evaluation of the IR-PHY proposal", *Doc. IEEE P802.11-94/97*.
- [Moreira94d] L. Moreira, A. Moreira, R. Valadas, A.M. de Oliveira Duarte, "Measurements of the power spectral density of a 1 Mbps 16-PPM signal", *Doc. IEEE P802.11-94/267*.
- [Moreira95] A. J.C. Moreira, R. T. Valadas, A. M. de Oliveira Duarte, "Characterisation and modelling of artificial light interference in optical wireless communication systems", *Proceedings of the sixth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'95)*, Toronto, Canada, pp. 326-331, September 1995.
- [Moreira96] A. J. C. Moreira, R. T. Valadas, A. M. de Oliveira Duarte, "Performance of infrared transmission systems under ambient light interference", *IEE Proc-Optoelectron.*, vol. 143, no. 6, pp. 339-346, December 1996.
- [Muoi83] T.V. Muoi, "Receiver design for digital fiber optic transmission systems using Manchester coding", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 31, no. 5, pp. 608-619, 1983.
- [Nakagawa07] M. Nakagawa, "Visible light communications," in *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies* October 2007.
- [Narasimhan96] R. Narasimhan, M.D. Audeh, J.M. Kahn, "Effect of electronic-ballast fluorescent lighting on wireless infrared links", *IEE Proceedings-Optoelectronics*, vol. 143, no. 6, pp. 347-354, Dec. 1996.
- [Navarro94] M.F. Navarro, A.P. Notario, "Análisis del canal en sistemas de comunicación óptica no guiada por difusión total", *IXV Simposium nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI 1994)*, Actas Tomo II, pp. 1055-1059, Las Palmas de Gran Canaria, Septiembre 1994.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fsbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- [O'Brien08] D. O'Brien, G. E. Faulkner, S. Ziki, N. P. Schmitt; "High Data-Rate Optical Wireless Communications in Passenger Aircraft: Measurements and Simulations"; *6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CNSDSP'2008)*, pp. 68-71, 2008.
- [O'Brien10] D. O'Brien, H. Le Minh, G. Faulkner, M. Wolf, L. Grobe, J. Li, O. Bouchet; "High data-rate infrared optical wireless communications: implementation challenges"; *IEEE Globecom 2010 Workshop on Optical Wireless Communications*, pp. 1047-1051, 2010.
- [Ohtsuki00] T. Ohtsuki, J.M. Kahn, "Turbo-coded optical PPM CDMA systems", ICC 2000, *IEEE International Conference on Communications*, vol. 2, pp. 939-943, June 18-22, 2000.
- [Ohtsuki99] T. Ohtsuki, "Rate adaptive indoor infrared wireless communication systems using repeated and punctured convolutional codes", ICC'99, *IEEE International Conference on Communications*, vol. 1, pp. 609-613, June 1999.
- [Pacheco97] P. Pacheco. "Parallel Programming with MPP". Morgan Kaufmann Publishers, 1997.
- [Pahlavan94] K. Pahlavan, A.H. Levesque; "Wireless data communications", *Proceedings of the IEEE*, vol. 82, no. 9, pp. 1398-1430, September 1994.
- [Pakravan97] M.R. Pakravan, E. Simova, M. Kavehrad, "Holographic diffusers for indoor infrared communications systems", *International Journal of Wireless Information Networks*, vol. 4, no. 4, pp. 259-274, Oct. 1997.
- [Pakravan98a] M.R. Pakravan, M. Kavehrad, H. Hashemi, "Measurement of rotation effects in an indoor infrared channel", VTC'98, *IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 3, pp. 2100-2103, 1998.
- [Pakravan98b] M.R. Pakravan, M. Kavehrad, H. Hashemi, "Effects of rotation on the path loss and delay spread in indoor infrared channels", ICC'98, *IEEE International Conference on Communications*, vol. 2, pp. 817-820, June 1998.
- [Park01b] H. Park, "Convolutional coded pulse-position modulation on wireless optical links", *IEE Proceedings-Optoelectronics*, vol. 148, no. 4, pp. 199-207, Aug. 2001.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- [Park96] H. Park, J.R. Barry, "Performance of multiple pulse position modulation on multipath channels", *IEEE Proceedings-Optoelectronics*, vol. 143, no. 6, pp. 360-365, Dec. 1996.
- [Park98] H. Park, "Trellis-coded multiple-position modulation for wireless infrared communications", *GLOBECOM'98, IEEE Global Telecommunications Conference*, vol. 1, pp. 225-230, Nov. 1998.
- [Pérez-Jiménez00] R. Pérez-Jiménez, J. Rabadán, F.J. López-Hernández, "Filtered modulation schemes for short distance infrared wireless communications", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 46, no. 2, May 2000.
- [Pérez-Jiménez95] R. Pérez-Jiménez, V.M. Melián, M.J. Betancor, "Analysis of Multipath Impulse Response of Diffuse and Quasi-Diffuse Optical Links for IR-WLAN", *Proc INFOCOM'95*, pp. 7d.3.1-7d.3.7, Boston, MA, USA, April 1995.
- [Pérez-Jiménez96a] R. Pérez-Jiménez, J.A. Rabadán, V.M. Melián, M.J. Betancor, "Improved PPM modulations for high spectral efficiency IR-WLAN", *PIMRC'96, IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 1, pp. 262-266, 1996.
- [Pérez-Jiménez96b] R. Pérez-Jiménez, J.A. Rabadán, M.J. Betancor, "2 Mbit/s FQPSK-2 modem for wireless infrared LANs", *Electronics Letters*, vol. 32, no. 20, Sep. 1996.
- [Pérez-Jiménez97] R. Pérez Jiménez, J. Berges, and M. J. Betancor, "Statistical model for the impulse response on infrared indoor diffuse channels", *IEE Electronics Letters*, vol. 33, no. 15, pp. 1298-1301, July 1997.
- [Personick73] S.D. Personick, "Receiver design for digital fiber optic communications systems, I and II", *Bell System Technical Journal*, vol 52, no.6, pp 843-886, July-August, 1973.
- [Personick80] R. G. Smith and S. D. Personick, "Receiver Design for Optical Fiber Communication Systems," in *Semiconductor Devices for Optical Communication*, H. Kressel, Ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1980.
- [Poves11] E. Poves, G. del Campo-Jimenez, F. J. Lopez-Hernandez; "VLC-based light-weight portable user interface for in-

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- house applications”, *IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)* 2011, pp. 365-367, 2011.
- [Quintana13] C. Quintana, V. Guerra, J. Rufo, J. Rabadán and R. Pérez-Jiménez, “Reading Lamp-Based Visible Light Communication System for In-flight Entertainment”, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 59, no. 1, pp:31-37, April 2013.
- [Rabadán00] J. Rabadán; “*Contribución al estudio de las comunicaciones ópticas difusas de alta velocidad mediante señales de espectro ensanchado*”; Tesis Doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2000.
- [Rabadán02] J. A. Rabadán, M. A. Bacallado, F. Delgado, R. Pérez-Jiménez, F. J. López-Hernández, “Conformation techniques for direct-sequence spread-spectrum wireless optical systems”, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 34, no. 5, pp. 360-364, Sep. 2002.
- [Rabadán04] J.A. Rabadán, M.A. Bacallado, F. Delgado, S.T. Pérez, R. Pérez-Jiménez, “Experimental characterization of a direct-sequence spread-spectrum optical wireless system based on pulse-conformation techniques for in-house communications”, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 50, no. 2, pp. 484-490, May 2004.
- [Rajagopal12] S. Rajagopal, R. D. Roberts, Sang-Kyu Lim, “IEEE 802.15.17 visible light communication: Modulation schemes and dimming support”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no.3, pp. 72-82, March 2012.
- [Rajbhandari15] S. Rajbhandari et al., “High-speed integrated visible light communication system: device constraints and design considerations”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 9, pp. 1750-1757, September 2015.
- [Roberts11] R.D. Roberts, S. Rajagopal, Sang-Kyu Lim “IEEE 802.15.7 physical layer summary” *IEEE GLOBECOM Workshops* 2011, pp: 772-776.
- [Rodríguez02] S. Rodríguez, R. Pérez Jiménez, F.J. López Hernández, O. González, A. Ayala, “Reflection model for calculation of the impulse response on IR-wireless indoor channels using ray-tracing algorithm”, *Microwave and Optical*

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fsbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- Technology Letters*, vol. 32, no. 4, pp. 296-300, February 2002.
- [Rodríguez03a] S. Rodríguez, R. Pérez Jiménez, O. González, J.A. Rabadán, B.R. Mendoza, “Concentrators and lenses models for calculation of the impulse response on IR-wireless indoor channels using ray-tracing algorithm”, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 36, no. 4, pp.262-267, February 2003.
- [Rodríguez03b] S. Rodríguez, “*Contribución al estudio de las técnicas de simulación de canales ópticos no guiados en interiores aplicadas al diseño de receptores en diversidad angular*”, Tesis Doctoral, Universidad de La Laguna, 2003.
- [Rodríguez03c] S. Rodríguez, R. Pérez Jiménez, F.J. López Hernández, O. González, B.R. Mendoza, “Models and algorithm for the calculation of the impulse response on IR-wireless indoor channels”, SPIE 2003, *The internacional Society for Optical Engineering*, vol. 5117, pp. 199-208, May 2003.
- [Rodríguez13a] S. Rodríguez, R. Pérez Jiménez, B. R. Mendoza, F. López-Hernández, A. Ayala-Alfonso, “Simulation of impulse response for indoor visible light communications using 3D CAD models visible light communications”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2013*, 2013:7, pp.1-10, January 2013.
- [Rodríguez13b] S. Rodríguez, A. García-Viera, B. R. Mendoza, O. González, A. Ayala, “Sistema THSS multiusuario para enlaces ópticos no guiados en el espectro visible”, *OPTOEL'13, VIII Reunión Española de Optoelectrónica*, pp. 150-155, Julio 2013.
- [Rodríguez13c] S. Rodríguez, B. R. Mendoza, R. Pérez Jiménez, O. González, A. García-Viera, “Design considerations of conventional angle-diversity receivers for indoor optical wireless communications”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2013*, 2013:221, pp.1-10, Sep. 2013.
- [Rufo15] J.F. Rufo Torres, “*Contribución al estudio de Servicios Soportados sobre Redes VLC (Visible Light Communications)*”, Tesis Doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2015.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- [Saleh87] A.M. Saleh y R. Valenzuela, "A statistical model for indoor multipath propagation", *IEEE Journal on selected areas on communications*, vol. SAC-5, no. 2, pp. 128-137, January 1987.
- [Samaras98] K. Samaras, A.M. Street, D.C. O'Brien, D.J. Edwards, "Error rate evaluation of wireless infrared links", *ICC'98, IEEE International Conference on Communications*, vol. 2, pp. 826-831, 1998.
- [Santamaría94] A. Santamaría, "Contribución al estudio de redes de área local con medios ópticos no guiados", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 1994.
- [Sarhazi14a] Sarhazi, E., Uysal, M., Abdallah, M., & Qaraqe, K. "Indoor channel modelling and characterization for visible light communications". *Transparent Optical Networks (ICTON 2014) 16th International Conference on. IEEE*, 2014.
- [Sarhazi14b] Sarhazi, E., Uysal, M., Abdallah, M., & Qaraqe, K. "Ray tracing based channel modeling for visible light communications". *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2014, 22nd. IEEE, 2014.
- [Sharif09] Sharif, A.; Potdar, V.; Chang, E. "Wireless multimedia sensor network technology: A survey". In *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, pp. 606–613, Cardiff, Wales, UK, 23–26 June, 2009.
- [Shiu98] D.-H. Shiu, J.M. Kahn, "Differential pulse position modulation for power-efficient wireless infrared communication", *GLOBECOM'98, IEEE Global Telecommunications Conference*, vol. 1, pp. 219-224, Nov. 1998.
- [Shrestha10] N. Shrestha, M. Sohail, C. Viphavakit, P. Saengudomlert, W. S. Mohammed, "Demonstration of visible light communications using RGB LEDs in an indoor environment", *International Conference on Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2010)*, pp. 1159-1163, 2010.
- [Shuailong13] Shuailong Z., Watson S., McKendry J.J.D., Massoubre D., Cogman A., Erdan Gu, Henderson R.K., Kelly A.E., Dawson M.D, "1.5 Gbit/s multi-channel visible light communications using CMOS-controlled GaN-based

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- LEDs”; *Journal of Lightwave Tech.*, vol. 31, no: 8, pp: 1211-1216, 2013.
- [Shun-Hsiang13] Y. Shun-Hsiang, O. Shih, T. Hsin-Mu, and R. Roberts, “Smart automotive lighting for vehicle safety,” *IEEE Communications Magazine*, vol.: 51, issue:12, pp.:50–59, December 2013.
- [Smith80] R. G. Smith and S. Personick, “Receiver design for optical fiber communication systems”. In *Semiconductor Devices for optical Communications*, Springer-Verlag, New York, 1980.
- [Smith82] R. G. Smith and S. Personick, “Receiver design for optical fiber communication systems”. *Topics in Applied Physics*, vol. 39, pp. 89-160, 1982.
- [Snir98] M. Snir and S. Otto. “*MPI-The Complete Reference: The MPI Core*”. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1998.
- [Steigerwald02] Steigerwald et al., “Illumination with solid state lighting technology”, *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 8, no. 2, pp. 310-320, March/April 2002.
- [Sterckx00] K. L. Sterckx, J. M. H. Elmirghani, and R. A. Cryan, “Sensitivity assessment of a three-segment pyramidal fly-eye detector in a semidispersed optical wireless communication link”, *Proc. IEE Optoelectron.*, vol. 147, pp. 286–294, Aug. 2000.
- [Szalabaj00] P. Szalabaj. “*CAD Principles for Architectural Design*”. Elsevier, 2000.
- [Tanaka03] Y. Tanaka, T. Komine, S. Haruyama, M. Nakagawa; “Indoor visible light transmission system utilizing white LED lights”; *IEICE Transactions on Communications*, vol. E86-B, no. 8, pp. 2440-2454, 2003.
- [Tang96] A.P. Tang, J.M. Kahn, K.-P. Ho, “Wireless infrared communications links using multi-beam transmitters and imaging receivers”, ICC’96, *IEEE International Conference on Communications*, pp. 180-186, June 23-27, 1996.
- [Tavares03] A. Tavares, R. Valadas, R. Aguilar, and A. O. Duarte, “Angle Diversity and Rate-Adaptive Transmission for Indoor Wireless Optical Communications”, *IEEE Communications Magazine: Optical Wireless Communications*, pp. 64 - 73, March 2003.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	Fecha:
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- [Tavares95] A. M. R. Tavares, R. J. M. T. Valadas, A. M. de Oliveira Duarte, "Performance of an optical sectored receiver for indoor wireless communication systems in presence of artificial and natural noise sources", *SPIE*, vol. 2601, pp. 264 - 273, 1995.
- [TG7rl-15-1] TG7rl, Technical Considerations Document, IEEE 802.15 Std., Rev. 3, July 2015. [Online]. Available: <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/15/15>.
- [Tonelo10] A. M. Tonello, F. Versolatto, S. D'Alessandro; "Opportunistic relaying in In-Home PLC networks", *IEEE Globecom 2010*, pp. 6-10, USA, 2010.
- [Tsai13] Chia-Lung Tsai; Zhong-Fan Xu "Line-of-Sight visible light communications with InGaN-based resonant cavity LEDs", *IEEE Photonics Tech. Letters*, vol: 25, no: 18, pp: 1793- 1796, 2013.
- [Tsauro94] T.H. Tsauro, K.C. Chen, C. Lien, M.T. Shih, C.P. Jeremy, "A nondirective infrared transceiver for indoor high speed wireless data communication", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 20-27, Feb. 1994.
- [Tsonev13] Tsonev, Dobroslav, Stefan Videv, and Harald Haas. "Light fidelity (Li-Fi): towards all-optical networking". *SPIE OPTO. International Society for Optics and Photonics*, 2013.
- [Tsonev14] Tsonev, D. et al. "A 3-Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a gallium nitride μ LED", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol:26, no: 7, pp. 637 – 640, January 2014.
- [Uysal14] Uysal, Murat, and Hatem Nouri. "Optical wireless communications-An emerging technology". *Transparent Optical Networks (ICTON 2014) 16th International Conference on IEEE*, 2014.
- [Valadas94] R.T. Valadas, A.M. Duarte, "Sectored receivers for indoor wireless optical communication systems", *PIMRC'94, IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 1090- 1095, Sep. 1994.
- [Velidi95] R. Velidi, C.S. Georghiadis, "Frame synchronization for optical multi-phase position modulation", *IEEE*

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- Transactions on Communications*, vol. 43, no. 2/3/4, pp. 1838-1843, Feb./March/April 1995.
- [Velsen97] M. Van Velsen and R. Fercoq. "3D-Studio File Format (.3ds)", January 1997.
- [Vento98] J.R. Vento Álvarez, "Contribución al Estudio de las Comunicaciones Ópticas no Guiadas con Señales de Espectro Ensanchado", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 1998.
- [Vento99] J.R. Vento Álvarez, R. Pérez-Jiménez, J.A. Rabadán, A. Santamaría, F.J. López-Hernández, "Experimental characterization of a direct sequence spread spectrum system for in-house wireless infrared communications", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 45, no. 4, pp. 1038-1045, Nov. 1999.
- [Vučić10] J. Vučić, C. Kottke, S. Nerreter, K. Langer, J. W. Walewski; "513 Mbit/s Visible Light communications Link Based on DMT-Modulation of a White LED", *IEEE Journal Of Lightwave Technology*, vol. 28, n. 24, pp. 3512-3518, 2010.
- [Vučić11] J. Vučić, C. Kottke, K. Habel, K. D. Langer; "803 Mbit/s visible light WDM link based on DMT modulation of a single RGB LED luminary"; *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC'2011)*, pp. 1-3, 2011.
- [Wong00] K.K. Wong, T. O'Farrell, M. Kiatweerasakul, "Infrared wireless communications using spread spectrum techniques", *IEE Proceedings-Optoelectronics*, vol. 147, no. 4, pp. 308-314, Aug. 2000.
- [Wong03] K.K. Wong, T. O'Farrell, "Spread spectrum techniques for indoor wireless IR communications", *IEEE Wireless Communications*, vol. 10, no. 2, pp. 54-63, April 2003.
- [Yun92] G. Yun and M. Kavehrad, "Spot diffusing and fly-eye receivers for indoor infrared wireless communications," *Proc. IEEE Conf. Selected Topics Wireless Communication*, Vancouver, BC, Canada, 1992, pp.286-292.
- [Zhang10] M. Zhang, Y. Zhang, X. Yuan, J. Zhang, "Mathematic models for a ray tracing method and its applications in wireless optical communications", *Optics Express*, vol. 18, no. 17, pp. 18431-18437, 2010.

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- [Zhang13] S. Zhang, Martin D. Dawson, “1.5 Gbit/s multi-channel visible light communications using CMOS-controlled GaN-based LEDs”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 8, pp. 1211-1216, April 2013.
- [Zhou07] J. Zhou, W. Yan; “Experimental investigation on the performance characteristics of white LEDs used in illumination application”, *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC 2007)*, pp. 1436-1440, 2007.

Direcciones web

- [3DSMax] <http://www.autodesk.com/3dsmax>
- [AirePointe] AirePointe Security and Government wireless bridges: <http://www.airepointe.com/>
- [Berkeley] Departamento de Ingeniería Eléctrica y Ciencias de la Computación de la Universidad de California en Berkeley, web: <https://eecs.berkeley.edu>
- [Blender] <http://www.blender.org>
- [Boston] Smart Lighting Engineering Research Center, “Synthesizing light for the benefit of humanity”, Boston University, USA, 2008. Web: <http://www.bu.edu/smartlighting>
- [Edinburgh] Profesor Harald Haas, Latest Li-fi Research News, University of Edinburgh, U.K. Web: <http://www.lifi.eng.ed.ac.uk>
- [Fraunhofer] <http://www.hhi.fraunhofer.de>
- [IDeTIC] Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, <http://www.idetic.ulpgc.es>
- [IEEE 802.15 TG7] IEEE 802.15 WPAN Taskgroup 7 (TG7) Visible Light Communication, 2014. Web: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG7.html>.
- [IrDA] Infrared Data Association (IrDA). Web: <http://www.irda.org>
- [JEITA] Japan Electronics and Information Technology Industries Association (JEITA), Web: <http://www.jeita.or.jp>

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	Código de verificación:	
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	866822	fbse0hw
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21

- [LightPointe] <http://www.lightpointe.com>
- [Lightware] <http://www.newtek.com/lightware/>
- [Maya] <http://www.autodesk.com/maya>
- [Northumbria] Optical Communications Research Group, in the School of CEIS, Northumbria University, in Newcastle, U.K.. Web: <http://soe.northumbria.ac.uk/ocr>
- [OMEGA] Comisión Europea, The Home Gigabit Access Project (OMEGA), Web: <http://www.ict-omega.eu>
- [Oxford] “Visible light communications”, University of Oxford, U.K., 2012. Web: <http://www.eng.ox.ac.uk/communications/research/optical-ommunications/current-projects-1/visible-light-communications-research/optical-communications>.
- [PureLiFi15] PureLiFi. March, 2015. Li-Flame demo. Web: https://www.youtube.com/watch?v=TIAS8BxGe_8
- [Sketchup] <http://sketchup.google.com>
- [Softimage] <http://www.softimage.com>
- [UP-VLC] <http://up-vlc.photonics.ac.uk>
- [VLCC] Visible Light Communication Consortium (VLCC), 2007. Web: <http://www.vlcc.net/modules/xpage1>

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento:	866822	Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

Lista de abreviaturas

AB-QAM	Adaptively Biased Quadrature Amplitude Modulation
ANSI	American National Standards Institute
APD	Avalanche PhotoDiode
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BDFE	Block-Decision Feedback Equalizer
BER	Bit Error Rate
BJT	Bipolar Junction Transistor
BREP	Boundary Representation
CAD	Computer Aided Design
CDMA	Code Division Multiple Access
CDR	Conventional angle-Diversity Receiver
CPC	Compound Parabolic Concentrator
CSK	Color Shift keying
DC	Direct Component
DD	Direct Detect
DFE	Decision Feedback Equalizer
DMT	Discrete MultiTone
DPIM	Digital Pulse Interval Modulation
DSP	Digital Signal Processor
EGC	Equal-Gain Combining
FET	Field Effect Transistor
FOV	Field Of View
FSO	Free Space Optics
GSC	Constructive Solid Geometry
IEC	International Electrotechnical Commission
IM	Intensity Modulation
IR	InfraRed
IrDA	Infrared Data Association
ISI	InterSymbolic Interference
JEITA	Japan Electronics and Information Tech. Industries Association
LD	Laser Diode
LED	Light-Emitting Diodes
LOS	Line Of Sight
MFC	Mached-Filter Combining
MIMO	Multiple Input and Multiple Output
MLC	Maximum-Likelihood Combining
MMC	Modified Monte Carlo

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA	Fecha: 08/03/2017 02:04:21
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ	08/03/2017 02:32:55
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ	08/03/2017 08:31:53
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 13:45:07
	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO	14/03/2017 21:06:21

MPI	Message Passing Interface
MRC	Maximal-Ratio Combining
MSM	Multiple Subcarrier Modulation
MU-CSK	MultiUser-Color Shift keying
NRZ	Non Return to Zero
OCC	Optical Camera Communications
OOK	On-Off Keying
OW	Optical Wireless
pc-LED	Phosphor Converted LED
PIN	Positive Intrinsic Negative
PL	Path Loss
PLC	Power Line Communications
PPM	Pulse Position Modulation
PTA	Photon-Tracing Algorithm
PWM	Pulse Width Modulation
RF	RadioFrequency
RZ	Return to Zero
SA	Simulated Annealing
SB	Selection Best
SDR	Sectorized angle-Diversity Receiver
SNR	Signal to Noise Ratio
SOR	Self-Orienting Receiver
SSL	Solid State Lighting
UP-VLC	Ultra-Parallel Visible Light Communications
VLC	Visible Light Communications
VLCC	Visible Light Communications Consortium
VOOK	Variable On-Off Keying
VPPM	Variable Pulse Position Modulation
WDM	Wavelength Division Multiplexing
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WSN	Wireless Sensor Network
YB-LED	Yellow-Blue LED

Este recibo incorpora firma electrónica de acuerdo a la Ley 59/2003 La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: http://sede.ull.es/validacion		
Identificador del documento: 866822		Código de verificación: fbsse0hw
Firmado por: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de BEATRIZ RODRIGUEZ MENDOZA		Fecha: 08/03/2017 02:04:21
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de SILVESTRE RODRIGUEZ PEREZ		08/03/2017 02:32:55
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de RAFAEL PEREZ JIMENEZ		08/03/2017 08:31:53
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 13:45:07
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA En nombre de ERNESTO PEREDA DE PABLO		14/03/2017 21:06:21