



Caracterización del canal óptico para la planificación de redes Li-Fi en entornos virtuales enriquecidos

Dioén Biosca Rojas, Alexis Alberto Cárdenas Barroso, Juan Orlando León Morales

RESUMEN

Entre las tecnologías más innovadoras de la actualidad aparece sin lugar a dudas Li-Fi (*Light-Fidelity* por sus siglas en inglés), una tecnología basada en la transmisión de datos a alta velocidad empleando la luz visible o infrarroja, la cual se presenta como un complemento a las soluciones basadas en Wi-Fi para accesos de banda ancha en entornos interiores o *ad-hoc* diversos. La estimación de los parámetros del canal óptico inalámbrico en dichos entornos es de gran importancia para la predicción del comportamiento y optimización de sistemas de este tipo. Tradicionalmente los esfuerzos en este sentido se han encaminado al análisis simplificado sobre escenarios vacíos, desprovistos de mobiliario u obstáculos de cualquier tipo típicamente presentes en oficinas y entornos de trabajo donde serían desplegados por excelencia sistemas de acceso Li-Fi. El presente trabajo propone la aplicación de un modelo general de simulación de la propagación de señales ópticas en el canal inalámbrico, desarrollado previamente por los autores y basado en el trazado de rayos de Monte Carlo modificado y el uso de funciones de reflectancia bidireccional (modelo TRM-B), sobre entornos virtuales enriquecidos, o sea, entornos tridimensionales sintetizados digitalmente que recrean con mayor precisión las características de los escenarios reales de despliegue, lo cual permite estimar con mayor exactitud los parámetros del canal y su rendimiento para sistemas Li-Fi.

Palabras claves: Li-Fi, VLC, canal óptico inalámbrico, trazado de rayos de Monte Carlo.

ABSTRACT

Among the most innovative and promising technologies at present time appears without place to doubts Li-Fi (Light-Fidelity), a technology based on high-speed data transmission using visible or infrared light, a complement to Wi-Fi based solutions for broadband access in diverse indoor or ad-hoc environments. The estimation of wireless optical channel parameters in such environments is of great importance for the prediction and optimization of such systems. Traditionally efforts have been made in this direction: the simplified analysis of empty scenarios, that is, devoid of furniture or obstacles of any kind typically present in offices and working environments where Li-Fi access systems would be deployed. The present work proposes the application of a general model of simulation of the propagation of optical signals in the wireless channel, developed previously by the authors and based on Monte Carlo ray-tracing and the use of bidirectional reflectance functions (TRM-B model), applied to enriched virtual environments, that is to say, digitally synthesized 3D environments that recreate with more precision the characteristics of real deployment scenarios, which allows a more accurate estimation of the channel parameters and its performance for Li-Fi systems.

Key words: Li-Fi, VLC, optical wireless channel, Monte Carlo ray-tracing.

Characterization of the Optical Channel for the Planning of Li-Fi Networks in Enriched Virtual Environments

1. INTRODUCCIÓN.

El área de las Comunicaciones por Luz Visible (VLC por sus siglas en inglés), es un campo emergente de las comunicaciones ópticas que se centra en la transmisión de datos en la parte del espectro electromagnético que los seres humanos pueden ver, una alternativa nueva que se viene proponiendo en los últimos años como una alternativa a la problemática de la saturación del espectro de radiofrecuencia. El espectro de la luz visible se ubica aproximadamente en el rango de 400 a 700nm. Se puede trabajar en cualquier intervalo de este rango de longitudes de onda para la transmisión de datos [1, 2].

Entre las principales aplicaciones de los sistemas VLC, cabe destacar la tecnología denominada *Light Fidelity* (Li-Fi por sus siglas en inglés), una tecnología inalámbrica, complementaria de las redes Wi-Fi, que supone una revolución en las Telecomunicaciones debido al principio que propone: el empleo del espectro de la luz visible (o infrarrojo), en lugar de ondas de radiofrecuencia, para la transmisión de datos sin cables a altísimas velocidades empleando como emisores lámparas o luminarias tipo LED. La idea de tener como punto de acceso las propias luminarias LED en un entorno de trabajo es de gran interés ya que se puede intercambiar información de manera muy rápida sin la necesidad de hacer grandes cambios en la infraestructura de iluminación de los distintos escenarios [1, 2, 3].

Debido a esto el canal de comunicaciones óptico inalámbrico ha sido objeto de importantes investigaciones en los últimos años [4-9] para garantizar la explotación óptima de los recursos que posee. La propagación de las señales ópticas en el canal inalámbrico en entornos interiores, así como las variantes para combatir sus limitaciones constituyen el área de mayor interés; dentro de ellas tienen un papel preponderante los modelos de simulación empleados para estimar los parámetros de los enlaces como son: la respuesta al impulso y el ancho de banda del canal, por citar solo algunos [6, 7, 9].

Ambas funciones características del canal citadas anteriormente son altamente dependientes de los parámetros geométricos del local, de los materiales de fabricación de los techos, paredes y pisos de la habitación, de la posición y orientación relativa entre el transmisor y el receptor, además de la existencia, ubicación y el tipo de material de los muebles u obstáculos presentes en el entorno. Lamentablemente la mayoría de las investigaciones desarrolladas por la comunidad científica han estado dirigidas a entornos vacíos, es decir, o bien con algunas limitadas representaciones de objetos tridimensionales [7] o completamente desprovistos de muebles y obstáculos en la escena [4-6, 8,9], lo que representa sin dudas una limitación, pues no es posible predecir de forma precisa el comportamiento del canal óptico inalámbrico sin tener en cuenta, en la propagación de la señal óptica, el efecto de los muebles u obstáculos presentes en el entorno.

En este trabajo se le da solución a dicha problemática al proponer el empleo del modelo general de simulación de la propagación de señales ópticas en el canal inalámbrico, basado en trazado de rayos de Monte Carlo modificado y funciones de reflectancia bidireccional (BRDF por sus siglas en inglés), actualizado para asimilar entornos virtuales enriquecidos. O sea, incorporando escenarios virtuales tridimensionales, completamente equipados y amueblados, sintetizados digitalmente, que recreen con mayor precisión las características de los escenarios reales de despliegue en entornos interiores diversos: oficinas, salas de reuniones, etc. Se hará referencia a este modelo empleando las siglas TRM-B en aras de acortar su prolongado nombre completo.

2. ELEMENTOS BASICOS DEL MODELO DE SIMULACION DEL CANAL OPTICO EN INTERIORES PARA UN SISTEMA Li-Fi.

Los elementos básicos del modelo del canal óptico inalámbrico lo constituyen tres elementos fundamentales; el emisor, el receptor y las superficies reflectoras [4].

2.1 EL EMISOR OPTICO.

En el caso del emisor óptico la intensidad radiante de la fuente emisora depende de la posición angular del punto analizado con respecto a la misma, según:

$$I(\alpha) = I_0 F(\alpha) \quad (1)$$

donde: I_0 : Intensidad máxima.
 $F(\alpha)$: Función que describe el diagrama direccional del emisor.
 α : Posición angular.

El diagrama direccional del emisor depende de su fabricación, y para encontrarlo es necesario obtener $F(\alpha)$ analítica o numéricamente a partir de datos suministrados por el fabricante. Para el caso de los emisores que su diagrama direccional obedece la ley de Lambert generalizada, con simetría de revolución, la función F toma la forma:

$$F(\alpha) = \cos^n(\alpha) \quad (2)$$

donde: n : Factor de forma del lóbulo de emisión.

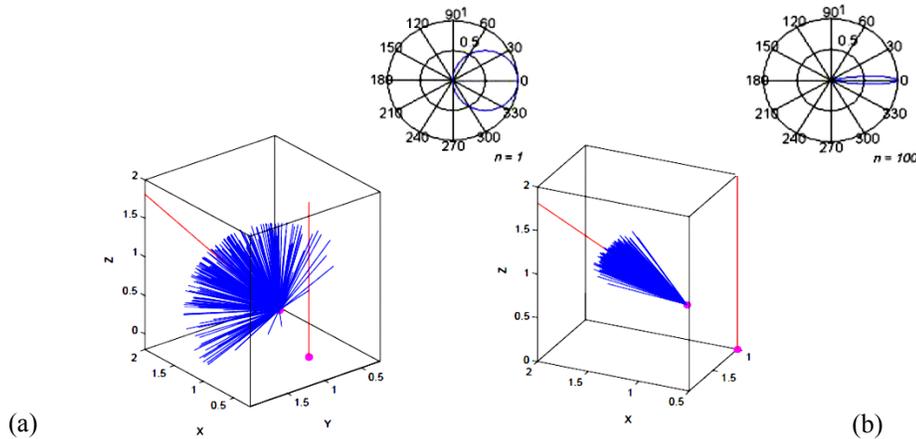


Figura 1

Diagramas direccionales de dos emisores de Lambert generalizados en los que se aprecia la diferencia en la direccionalidad del emisor al emplear distintos factores de forma n . (a) $n=1$ (b) $n=100$.

La figura 1 muestra los diagramas direccionales de dos emisores de Lambert generalizados con diferentes factores de forma, se aprecia como el grado de direccionalidad del emisor aumenta en la medida que el factor de forma n se hace mayor.

2.2 EL RECEPTOR OPTICO.

Los parámetros que caracterizan a un receptor óptico simple son su área fotosensible (A_r) y su campo de vista (FOV). El FOV es el ángulo, medido a partir de la normal al receptor, que determina el cono de direcciones de incidencia de la radiación visible capaz de producir fotocorriente detectada durante el proceso de detección.

2.3 LA SUPERFICIES REFLECTORAS.

Las superficies reflectoras se asumen homogéneas, y a efectos de los casos estudio tratados en el presente trabajo, con un comportamiento ideal como reflectores de Lambert caracterizadas por su coeficiente de reflexión (ρ), lo cual simplifica el análisis sin pérdida de generalidad al ser este el modelo de reflector más común en la mayoría de los escenarios. No obstante, el modelo TRM-B que se propone incorpora el uso de las funciones BRDF, las cuales permiten la modelación de superficies cuyos patrones de reflectividad difieran del Lambertiano (Difusor) puro; modelos de reflectividad con componentes especulares de importancia, tales como los de Phong, Torrance-Sparrow o Blinn, entre otros, podrían ser incluidos en la estimación del canal si fuera requerido.

3. ALGORITMO GENERAL DE TRAZADO DE RAYOS POR MONTE CARLO MODIFICADO EMPLEADO EN EL MODELO TRM-B.

La ventaja fundamental del esquema de trazado de rayos por Monte Carlo modificado, que lo hace tan eficiente, radica en la combinación de técnicas probabilísticas y determinísticas, ya que los rayos se trazan aleatoriamente desde el transmisor y en cada reflexión se fuerza el cálculo de la contribución de potencia correspondiente sobre el receptor. A partir del emisor, que

se considera una fuente extendida de Lambert con potencia total P_s , se lanzan NR rayos a los que se le asigna una potencia inicial de partida P_s/NR siguiendo el patrón del emisor. Cada vez que un rayo incide sobre un obstáculo, el mismo se convierte en un nuevo emisor y se trazan rayos a partir de él, de forma iterativa o recursiva, según el modelo de BRDF de la superficie en cuestión. En cada reflexión se calcula el aporte de potencia al receptor y el proceso continúa hasta que el tiempo de vuelo de los rayos sobrepase el tiempo máximo a considerar en la respuesta al impulso que se desea estimar o hasta que la cantidad de rebotes que experimente cada rayo sea mayor que una cantidad k prefijada inicialmente, normalmente con $k = 5$ rebotes es suficiente.

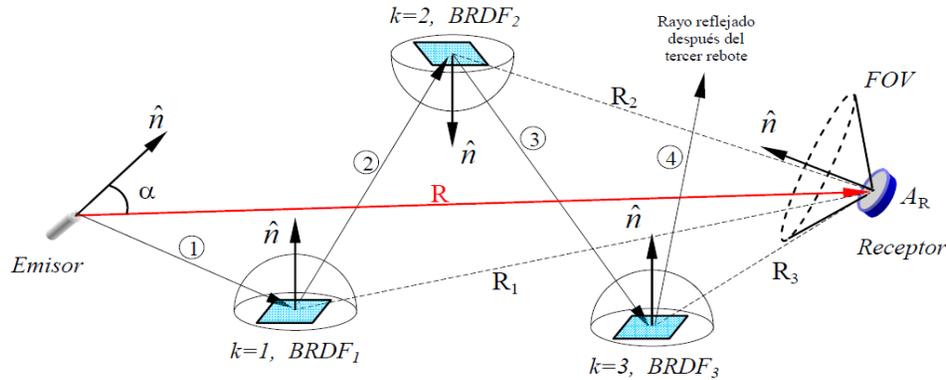


Figura 2

Interacciones posibles entre los elementos del modelo general de propagación de señales ópticas basado en Monte Carlo modificado y funciones BRDF, modelo TRM-B.

En la figura 2 puede apreciarse la trayectoria de un rayo lanzado desde el emisor que experimenta $k = 3$ rebotes sobre diferentes superficies reflectoras, cada una caracterizada por su BRDF. Los segmentos de la trayectoria del rayo han sido identificados con los números 1,2,3,4. En cada rebote aparece representada la dirección del rayo reflejado y, en línea discontinua, la dirección para el cálculo del aporte al receptor (vectores “ R_1 ”, “ R_2 ” y “ R_3 ”). El vector “ R ” en la figura representa el aporte de la línea de visibilidad directa (LOS por sus siglas en inglés) entre el transmisor y el receptor; para su cálculo es necesario evaluar primero si, dadas las ubicaciones y orientaciones tanto del emisor como el receptor, existe o no bloqueo en esta trayectoria.

3.1 RESPUESTA AL IMPULSO DE LINEA DE VISIBILIDAD DIRECTA.

La respuesta al impulso de línea de visibilidad directa para trazado de rayos, partiendo de que el emisor está caracterizado por un patrón de intensidad radiante generalizado de Lambert, corresponde a la potencia recibida por la componente LOS que se calcula por:

$$h^0(t, Tx, Rx) = \frac{n + 1}{2\pi R^2} P_s A_r \cos^n(\alpha) \cos(i_3) V(Tx, Rx) \text{rect}(i_3, FOV) \delta\left(t - \frac{R}{c}\right) \quad (3)$$

donde:

- n : Factor de forma
- R : Distancia entre Transmisor y Receptor
- P_s : Potencia del Rayo
- $\cos^n(\alpha)$: Forma del Lóbulo de Emisión
- $\cos(i_3)$: Ángulo de Incidencia con respecto a la Normal del Receptor
- c : Velocidad de la Luz

En la ecuación (3) se han incorporado dos funciones: la función de visibilidad $V(Tx, Rx)$, que toma valor “1” si existe línea de visibilidad directa no obstruida entre emisor y detector y “0” en caso contrario y la función $\text{rect}(i_3, FOV)$, que toma valor “1” siempre que dicha trayectoria LOS caiga dentro del FOV del detector en cuestión y “0” si dicha condición no se cumple.

3.2 RESPUESTA AL IMPULSO PARA MULTIPLES REBOTES.

La expresión del aporte de potencia de un reflector simple sobre el receptor se expresa como:

$$dP_{Rx} = \frac{P_i}{R^2} f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_{Rx}, \phi_{Rx}) \cos(\theta_r) A_r \cos(i_3) V(C_2, Rx) \text{rect}(i_3, FOV) \quad (4)$$

Asociando el término P_i al valor de potencia que porta el rayo incidente sobre el elemento de superficie C_2 . En este caso la función de visibilidad $V(C_2, Rx)$, tendrá en cuenta si hay o no obstrucción entre el elemento de superficie en cuestión y el receptor. En la ecuación (4) se aprecia además la presencia de la función $f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_{Rx}, \phi_{Rx})$, que constituye la BRDF de la superficie del elemento reflector; de esta forma se tiene en cuenta en el modelo TRM-B las características de reflectividad de las diferentes superficies presentes en la escena y su interacción con la señal óptica que se propaga.

La respuesta al impulso para NR rayos lanzados y un número infinito de rebotes según el modelo TRM-B es:

$$h^{(k,k \neq 0)}(t, Rx, Tx) = \sum_{i=1}^{NR} \sum_{k=1}^{\infty} dP_{Rx}^{(k)}(t) \quad (5)$$

Donde los aportes $dP_{Rx}^{(k)}(t)$ individuales se calculan para cada uno de los NR rayos lanzados en cada uno de los k rebotes que se deseen tener en cuenta en la respuesta al impulso a estimar. La respuesta al impulso obtenida por esta vía es un histograma de los diferenciales de potencia que han ido arribando al receptor en distintos instantes de tiempo provenientes de todas direcciones, razón por la cual la respuesta al impulso en este caso se expresa en watts. El tiempo estimado para el cálculo de la respuesta al impulso se determina de acuerdo a las dimensiones del local, teniendo en cuenta que la mayor distancia posible a recorrer por un rayo dentro del entorno es la diagonal principal de la habitación, la expresión para estimar la duración máxima posible de la respuesta al impulso es:

$$T = L \frac{(k + 1)}{c} \quad (6)$$

- donde:
- T: Ventana de tiempo para la estimación de la respuesta al impulso
 - L: Longitud de la diagonal principal de la habitación
 - k: Número máximo de rebotes a tener en cuenta
 - c: Velocidad de la luz

4. CASO DE REFERENCIA DE LA HABITACION VACIA.

La figura 3 ofrece los datos de configuración y el esquema de la habitación “A”, completamente vacía, que se toma como caso de estudio de referencia. La respuesta al impulso obtenida para este escenario, con las disposiciones de emisor y receptor que se muestran, fue obtenida y publicada por Barry *et al* [5] con anterioridad y se emplean sus resultados como referencia para la comprobación del modelo TRM-B.

Habitación		Emisor		Receptor	
Largo (x)	5 m	Factor (n)	1	Área	1 cm ²
Ancho (y)	5 m	X	2.5 m	FOV	85°
Altura (z)	3 m	Y	2.5 m	X	0.5 m
ρ (norte)	0.8	Z	3 m	Y	1 m
ρ (sur)	0.8	Elevación	-90°	Z	0 m
ρ (este)	0.8	Azimut	0°	Elevación	90°
ρ (oeste)	0.8			Azimut	0°
ρ (techo)	0.8				
ρ (piso)	0.3				
Resolución: 0.2 ns					

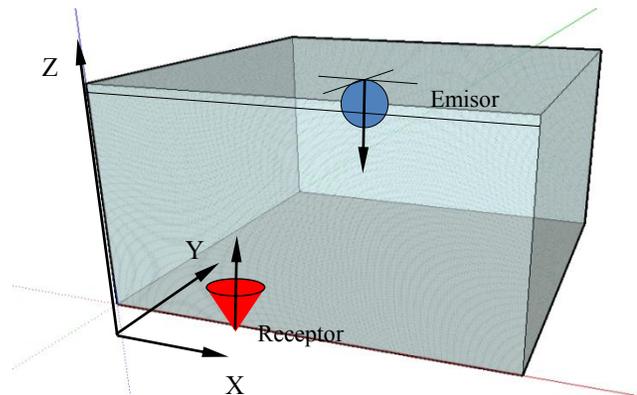


Figura 3

Datos de configuración y esquema para el caso de estudio de referencia de la habitación vacía.

Para este caso la ventana de tiempo obtenida es de aproximadamente 70 ns con una resolución de 0.2 ns. La respuesta obtenida se calcula con un trazado de NR=100000 rayos, siendo este un valor adecuado de compromiso entre el grado de correspondencia obtenido y el tiempo de cómputo del algoritmo, ya que el criterio para la selección de NR se basa en la reducción de la varianza de los valores de la respuesta al impulso entorno a su valor promedio. Para la simulación se utilizaron una serie de scripts desarrollados sobre MATLAB R2013b.

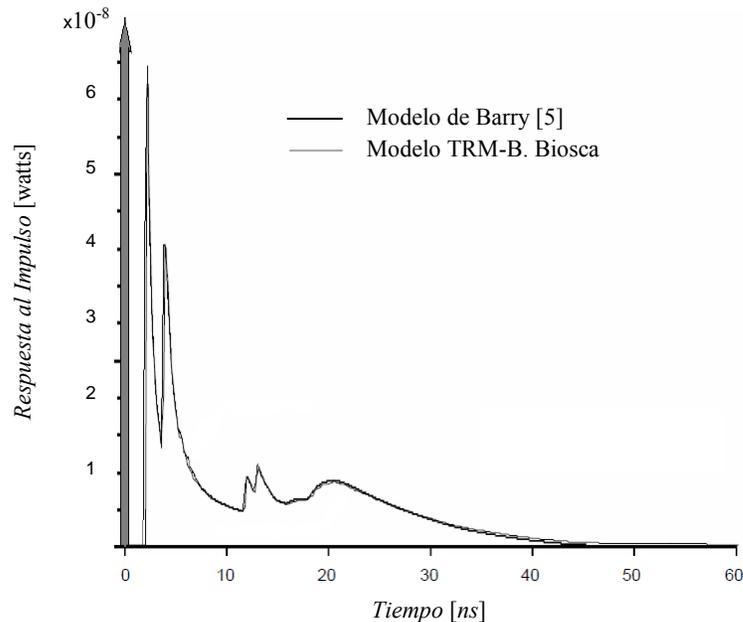


Figura 4

Respuesta al impulso obtenida para el caso de referencia con los modelos de Barry y Biosca (TRM-B).

En la figura 4 se aprecia la total correspondencia entre los resultados obtenidos por el modelo de Barry [5] y el TRM-B de Biosca, para el caso de la habitación vacía que se toma como caso de referencia para la validación del nuevo modelo.

Establecida esta validación puede procederse a la aplicación del nuevo modelo en el estudio de escenarios más complejos, que recreen con mayor precisión los entornos de despliegue reales.

5. DISEÑO DE ESCENARIOS VIRTUALES ENRIQUECIDOS.

Las escenas virtuales se desarrollaron con el software Autodesk 3DS Max 2009 y se exportaron empleando un *plugin* específico denominado OgreMaxSceneExporter 2.2. Una vez exportadas la escenas, estas pueden cargarse con la plataforma Ogre 3D. Los proyectos de Ogre3D pueden ser modificados desde Visual Studio, particularmente la versión empleada fue la del 2008, y hacer las modificaciones necesarias a los mismos directamente sobre el código fuente que se encuentra en lenguaje C++. Este fue el procedimiento empleado para adicionar, en campos disponibles de los objetos representados en las escenas virtuales, los coeficientes de reflectividad de cada una de las superficies presentes en cada elemento componente de la escena. Se trata de un trabajo verdaderamente arduo ya que para completar la información de una escena dada, dependiendo de la cantidad de elementos presentes en la misma, pueden llegarse a necesitar más de doscientas modificaciones para incluir los citados coeficientes. Todo el código del algoritmo de trazado de rayos por Monte Carlo modificado, originalmente desarrollado para MATLAB2013b fue necesario traducirlo a C++ e incorporarlo en el proyecto que maneja la escena, que se encarga también del trazado de rayos, el cálculo de las intersecciones con las distintas superficies así como de la generación de las nuevas direcciones para los rayos reflejados.

Con el objetivo de ejemplificar la aplicación del modelo TRM-B para el estudio del canal óptico en sistemas Li-Fi se propone el análisis de dos casos de estudio: (1) Un salón de conferencias y (2) Una sala de estudio. En ambos casos se

incluye todo el mobiliario característico de este tipo de locales y además, se analizan distintos planes de iluminación; teniendo en cuenta que en un sistema Li-Fi los datos son transmitidos desde las mismas luminarias de la habitación, se demuestra la posibilidad que brinda el modelo de analizar el aporte individual a la respuesta al impulso de cada una de las luminarias por separado, así como la obtención de la respuesta al impulso total dada la contribución de todas las luminarias presentes en el escenario. Las BRDF empleadas para las superficies en el modelo TRM-B son de Lambert, caracterizadas por los coeficientes de reflexión típicos de cada una.

5.1 CASO DE ESTUDIO 1: EL SALON DE CONFERENCIAS.

En la figura 5 se muestra la escena virtual que representa el caso de estudio no.1 “Salón de conferencias”. Se ha retirado el techo y el plano frontal de la misma para una mejor visualización. Se observa además el detalle de la ubicación del receptor, sobre la mesa, orientado verticalmente hacia arriba. De esta forma se simula un modem Li-Fi que puede conectarse a una laptop como un periférico más. En la figura también aparece la información de configuración de la escena, las posiciones de las luminarias dependen del plan de iluminación que se escoja, elemento que se analiza a continuación. Observar que la escena cuenta con cuantiosos ventanales de cristal que junto con el mobiliario, superficies curvas y todos los otros detalles que se incorporan, constituyen elementos novedosos incluidos en la modelación.

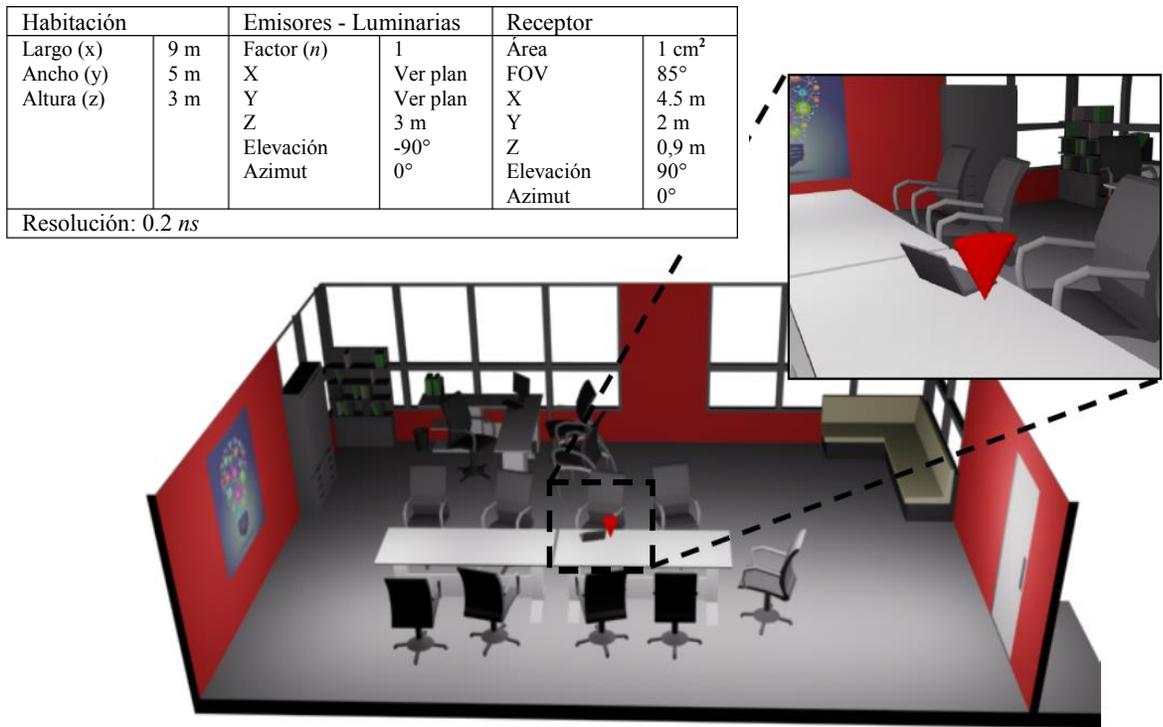


Figura 5
 Caso de estudio no. 1, entorno virtual enriquecido “Salón de Conferencias”.

Las luminarias presentes en la escena se asumen emisores Lambertianos ideales con factor de forma $n = 1$ y a efectos del análisis, pueden disponerse en uno de los planes de iluminación que aparecen en la figura 6.

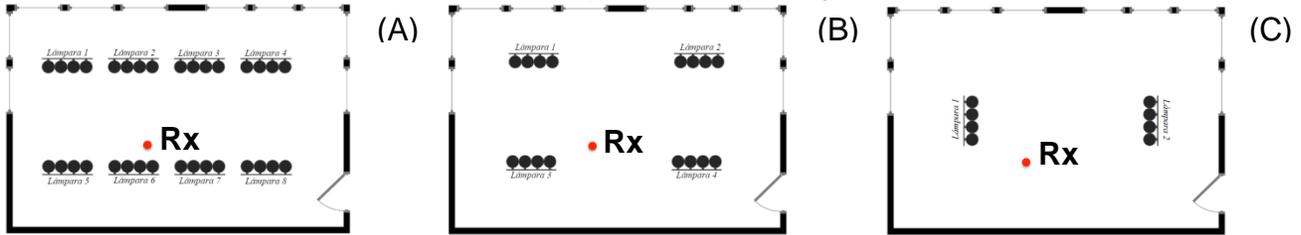


Figura 6.

Planes de iluminación A, B y C propuestos para el caso de estudio no.1 “Salón de Conferencias”. Con un punto rojo se representa la ubicación relativa del receptor en la escena.

Observar como los distintos planes de iluminación pueden estar compuestos por diferentes números de luminarias y diferentes disposiciones relativas de las mismas en la escena. El plan A está compuesto por ocho lámparas en dos filas de cuatro, digamos el plan de iluminación más común que se propondría para un salón así; mientras que los otros dos planes se incorporan para enriquecer el análisis, el B con cuatro lámparas y el C con solo dos y con una orientación diferente.

La figura 7 muestra las respuestas al impulso obtenidas para cada una de las lámparas, por separado, que conforman el plan de iluminación A. En este caso la ventana de tiempo utilizada, tomando en cuenta el criterio definido por la ecuación (6) es de $T=70 \text{ ns}$. La resolución es de 0.2 ns .

De acuerdo a la distribución de las luminarias se aprecian varios detalles. Primeramente la diferencia en el tiempo de arribo de las componentes de cada respuesta revela la diferencia en distancia entre cada luminaria y el receptor. Adicionalmente puede notarse que los aportes más significativos los realizan las lámparas 6 y 7, más cercanas al receptor que el resto. Las demás lámparas contribuyen fundamentalmente al ensanchamiento de la respuesta al impulso total de la escena debido a la diferencia en los tiempos de arribo (aumento del *delay spread* del canal) y la cantidad y aporte de los rebotes k que se consideren en el cálculo. Esto contribuirá a la limitación en el ancho de banda de coherencia que puede ofrecer este plan de iluminación.

La respuesta al impulso total, debido al aporte de las NL luminarias presentes en la escena, se calcula por superposición empleando la expresión:

$$h(t) = \sum_{i=1}^{NL} h_i(t) \quad (7)$$

En la figura 8 se aprecia la respuesta al impulso compuesta obtenida para el plan de iluminación A. Se ha incluido también la obtenida para el plan de iluminación B de solo cuatro lámparas, a escala ambas figuras una encima de la otra.

De la figura 8 se aprecia la diferencia en el *delay spread* obtenido para el canal óptico en ambos planes de iluminación. Claramente $\tau_A > \tau_B$, lo que lleva a la conclusión de que pensando en un plan de iluminación diseñado para obtener el mayor desempeño posible, sería preferible el plan de iluminación B con solo cuatro luminarias sobre el A con ocho, para la posición del receptor dada. Saldando la diferencia en potencia absoluta recibida, ya que se observa que para el plan de iluminación B la potencia promedio recibida es del orden de la mitad que para el plan A, una distribución de solo cuatro lámparas sería la seleccionada. Si la sensibilidad del receptor lo permite o si es posible incorporar una ganancia adicional en el mismo, esta diferencia no sería una dificultad. Claro está, el análisis de un escenario particular para el despliegue de una solución Li-Fi deberá incluir el estudio de otras posiciones posibles para el receptor, ya que los parámetros del canal y su rendimiento son altamente dependientes de la disposición relativa de emisores y receptores. Igualmente puede pensarse en soluciones híbridas donde no todas las luminarias se empleen para la transmisión de datos, buscando la optimización del rendimiento del canal. Los resultados del plan C son similares a los del plan A del caso de estudio no.2 y se omiten aquí.

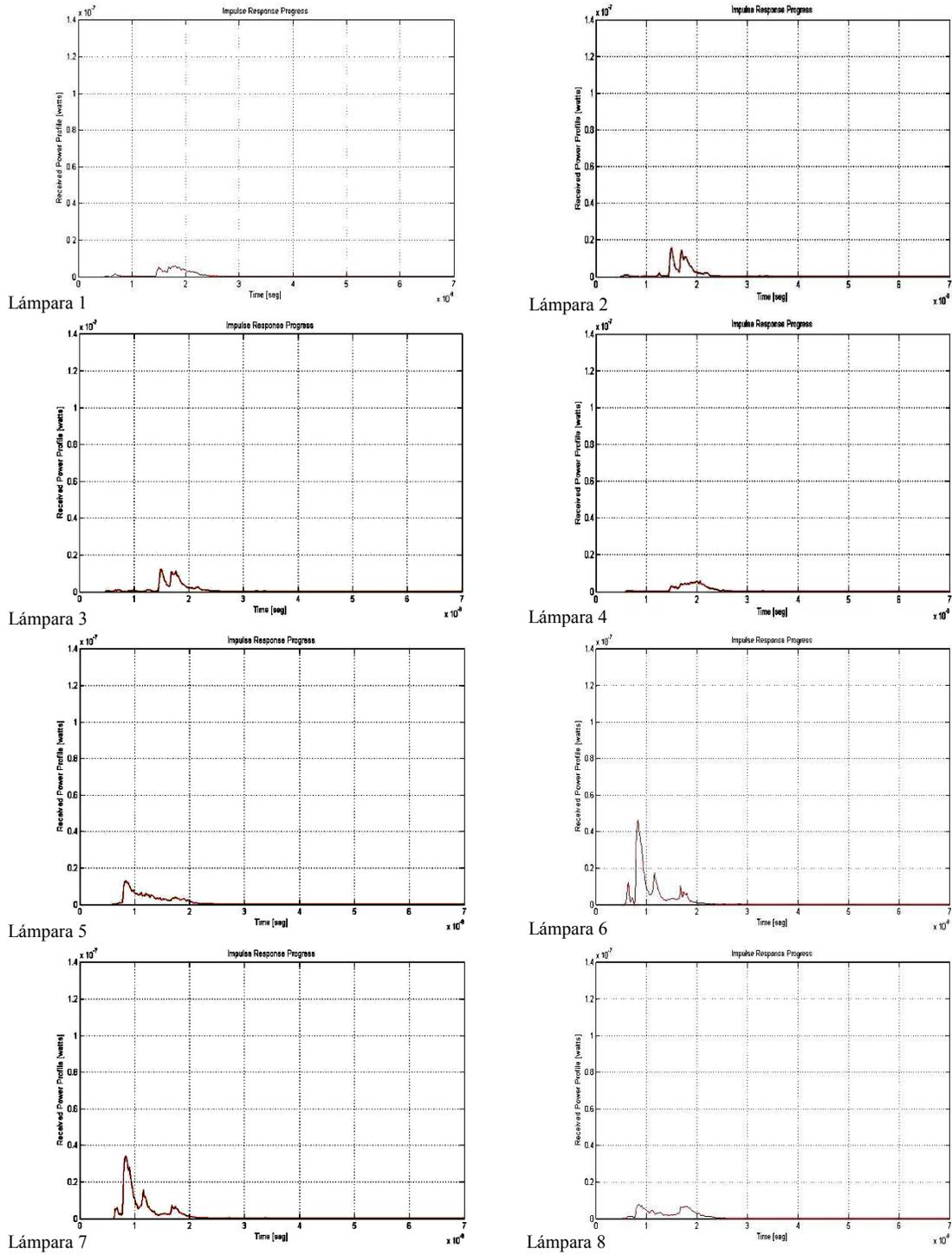


Figura 7

Respuestas al impulso obtenidas para cada una de las lámparas que conforman el plan de iluminación A para el caso de estudio no.1 “Salón de Conferencias”.

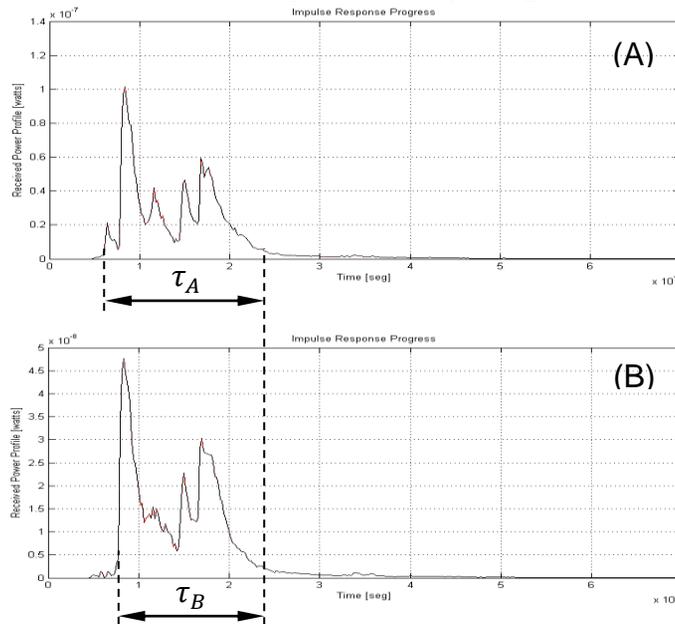


Figura 8

Respuestas al impulso obtenidas para los planes de iluminación A y B en el caso de estudio no.1 “Salón de Conferencias”.

5.2 CASO DE ESTUDIO 2: LA SALA DE ESTUDIO.

El entorno que constituye el caso de estudio no.2 “Sala de estudio”, recreado virtualmente, se muestra en la figura 9. Como en el caso anterior, se ha retirado el techo para facilitar su visualización. Se observa además el detalle de la ubicación del receptor, sobre la mesa, orientado verticalmente hacia arriba, simulando un modem Li-Fi conectado a una laptop. En la figura también aparece la información de configuración de la escena, las posiciones de las luminarias dependen como antes del plan de iluminación que se escoja.

Habitación		Emisores - Luminarias		Receptor	
Largo (x)	5 m	Factor (n)	1	Área	1 cm ²
Ancho (y)	4 m	X	Ver plan	FOV	85°
Altura (z)	3 m	Y	Ver plan	X	2.4 m
		Z	3 m	Y	1.4 m
		Elevación	-90°	Z	0.9 m
		Azimut	0°	Elevación	90°
				Azimut	0°
Resolución: 0.2 ns					

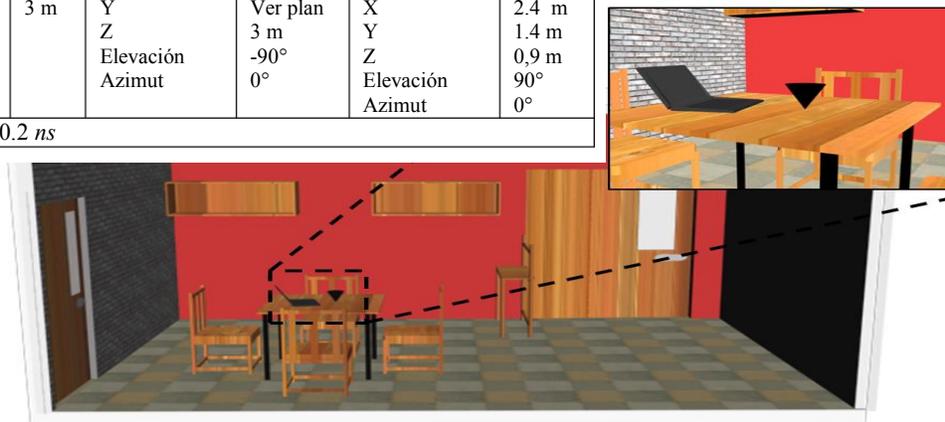


Figura 9

Caso de estudio no. 2, entorno virtual enriquecido “Sala de Estudio”.

Las luminarias presentes en la escena se asumen igualmente emisores Lambertianos ideales con factor de forma $n = 1$ y se proponen dos planes de iluminación: el A con dos luminarias y el B con solo una; ambos se muestran en la figura 10 a continuación. En la figura se representa también, con un punto rojo, la posición relativa del receptor con respecto a las luminarias. La posición del receptor es la misma para ambos planes de iluminación.

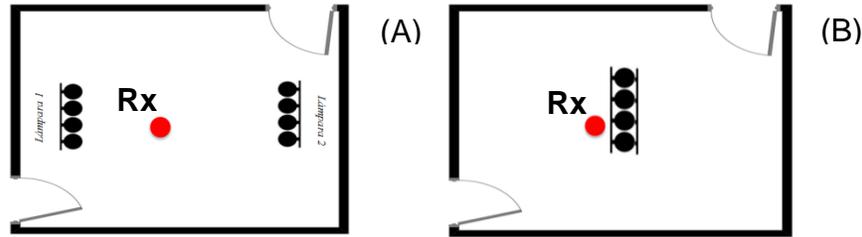


Figura 10

Planes de iluminación A y B propuestos para el caso de estudio no.2 “Sala de Estudio”. Con un punto rojo representa la ubicación relativa del receptor.

En la figura 11 se aprecian las respuestas al impulso compuestas obtenidas para ambos planes de iluminación. En este caso, por la evaluación de la ecuación (6), con una ventana de simulación de 50 ns es suficiente.

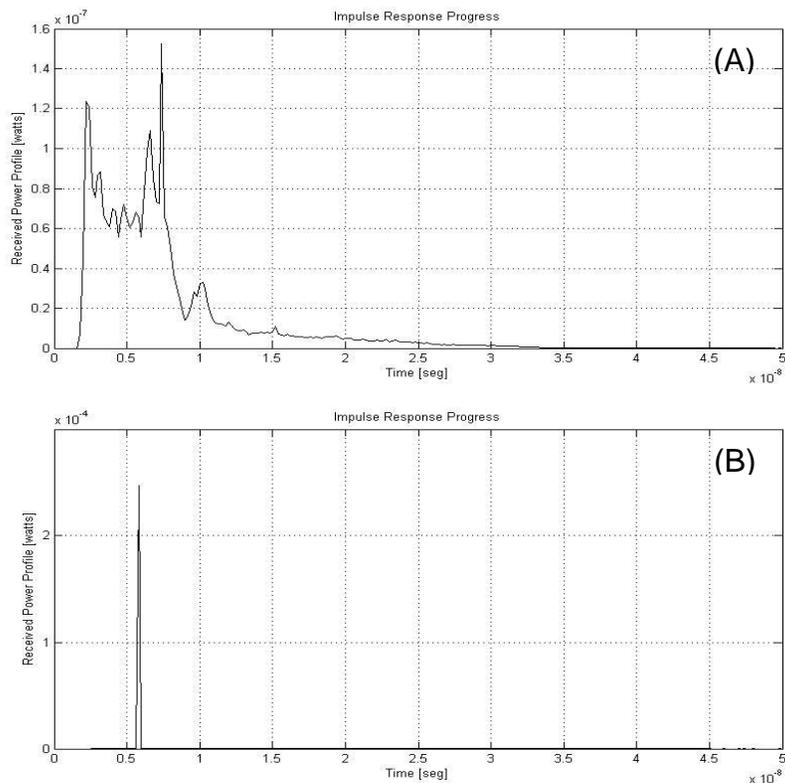


Figura 11

Respuestas al impulso obtenidas para los planes de iluminación A y B en el caso de estudio no.2 “Sala de Estudio”.

En este caso, dada la poca presencia de mobiliario en la escena y la diferencia en la disposición de las luminarias, existe una gran diferencia entre las respuestas al impulso producidas por ambos planes de iluminación. En el caso del plan A, con dos lámparas en los extremos de la habitación, se obtiene una respuesta al impulso ensanchada y con un nivel promedio de

potencia recibida inferior al que se obtiene para el plan de iluminación B. En el caso del plan B, con una sola lámpara en medio de la escena, predomina la componente de línea de visibilidad directa y el *delay spread* del canal en este caso es mínimo. La potencia promedio recibida es tres órdenes de magnitud superior que en el caso del plan de iluminación A. este es un claro ejemplo de que un menor número de lámparas en la escena no necesariamente implica un menor valor de potencia promedio percibida por el receptor. Este resultado depende de la disposición relativa y orientación existente entre el receptor y las luminarias. En el caso del plan de iluminación A, a pesar de haber dos lámparas, estas están situadas hacia los extremos de la habitación, con el receptor ubicado hacia el centro, lo que hace que el ángulo entre la normal al receptor y el radio vector entre el receptor y las luminarias sea mayor; como el área efectiva del receptor depende del coseno del ángulo antes mencionado, en la medida que ese ángulo es mayor, el área efectiva del receptor disminuye y por ese motivo se percibe un valor de potencia óptica promedio inferior.

Para el despliegue de un sistema Li-Fi en un escenario como este, sería conveniente emplear un plan de iluminación como el B o uno híbrido, en el que se emplee como luminaria Li-Fi una que este situada al centro de la habitación (garantizando el predominio de la componente LOS en la propagación) y tal vez otras luminarias adicionales, no empleadas para la transmisión de datos, en otros puntos de la habitación, aumentando el nivel de iluminación para facilitar la visibilidad en un entorno de estudio, pero que no influirían en el detrimento de los parámetros del canal óptico al no aportar al incremento del *delay spread* del mismo.

6. CONCLUSIONES.

El presente trabajo reporta la aplicación del modelo general de propagación de señales ópticas en el canal inalámbrico, basado en trazado de rayos de Monte Carlo modificado y funciones de reflectancia bidireccional, llamado modelo TRM-B, desarrollado con anterioridad, a entornos virtuales tridimensionales que recrean con gran semejanza los escenarios de despliegue reales donde pueden encontrar aplicación las soluciones basadas en Li-Fi. Se incluye, a modo de complemento, la validación hecha previamente al modelo desarrollado contra un caso de referencia establecido y reportado por la literatura científica en el tema desde hace varios años.

Como elemento novedoso se tiene la posibilidad de incorporar, en las escenas virtuales que se recrean para la simulación, todo tipo de elementos como pueden ser mobiliario variado, ventanas de cristal, puertas, superficies curvas, etc., elementos que hasta ahora no se habían incluido en los modelos reportados y que aportan mayor precisión a la hora de la determinación del rendimiento de una configuración de despliegue determinada en un entorno dado.

Si bien el proceso de incorporación de los datos de reflectividad de cada una de las superficies que pueden existir en una escena al modelo es trabajoso y largo, el mismo lo permite, pudiendo asimilar incluso funciones de reflectancia más complejas, diferentes a las del reflector Lambertiano puro si se requiriera. La combinación de estos elementos atribuye al modelo TRM-B una mayor exactitud. El mismo constituye una herramienta interesante para el diseño, planeamiento y optimización de soluciones de acceso basadas en tecnología Li-Fi, brindando mayor precisión en la estimación de los parámetros y el rendimiento del canal óptico.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer de manera especial al Dr. José Ignacio Guzmán Montoto por su contribución en la elaboración de este trabajo.

REFERENCIAS

1. Hass H., "High-speed wireless networking using visible light". SPIE Newsroom. Vol. 1, pp. 1 - 3. April 2013. (<http://spie.org/newsroom/4773-high-speed-wireless-networking-using-visible-light?ArticleID=x93593>)
2. Haas H., Chen C., "What is LiFi?" European Conference on Optical Communication ECOC 2015, 27 Sept.-1 Oct. 2015, IEEE Xplore Digital Library 2015. (<http://ieeexplore.ieee.org/document/7341879/>)
3. Karthika R., Balakrishnan S. "Wireless Communication using Li-Fi Technology". SSRG International Journal of Electronics and Communication Engineering (SSRG-IJECE) Vol. 2 Issue 3, ISSN:2348-8387, March 2015.

4. Gfeller F. R., Bapst U. H., “Wireless In-House Data Communication via Diffuse Infrared Radiation,” Proceedings of the IEEE, Vol. 67, No. 11, pp. 1474-1486, Nov. 1979.
5. Barry J., Kahn J., Krause W., Lee E. and Messerschmitt D., “Simulation of Multipath Impulse Response for Indoor Wireless Optical Channels,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 11, no. 3, pp. 367-379, April 1993.
6. Sakib C. M. I., Zhang W. and Kavehrad M., “Combined Deterministic and Modified Monte Carlo Method for Calculating Impulse Responses of Indoor Optical Wireless Channels”. Journal of Lightwave Technology. Vol. 32, Issue 18. ISSN: 0733-8724. September 2014.
7. Rodríguez *et al*, “Simulation of impulse response for indoor visible light communications using 3D CAD models. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. Vol. 1, Issue 7. 2013. (http://oa.upm.es/25806/1/INVE_MEM_2013_160723.pdf)
8. Raza I., Jabeen S. et al, “Optical Wireless Channel Characterization for Indoor Visible Light Communications”. Indian Journal of Science and Technology. Vol. 8, Issue 22. ISSN : 0974-6846. September 2015.
9. Chen C., Basnayaka D., Haas H. “Non-line-of-sight channel impulse response characterisation in visible light communications”. IEEE International Conference on Communications ICC 2016. IEEE Xplore Digital Library. ISSN 1938-1883. May 2016. (<http://ieeexplore.ieee.org/document/7511382/>)

AUTORES

Dioén Biosca Rojas, Es graduado de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría” CUJAE, en 1995. Obtuvo el grado de Master en Informática Aplicada por el Centro Regional para el Entrenamiento de Profesores de Ingeniería y Arquitectura en el uso de la Informática. CREPIAI en 1998. Obtuvo el grado de Doctor en Ciencias Técnicas por la CUJAE en el año 2005, con una tesis relacionada con la modelación de canales de comunicaciones ópticas inalámbricas en interiores. Actualmente se desempeña como especialista general de electrónica de la empresa mixta Copal S.A. al mismo tiempo que ejerce como profesor titular adjunto del Departamento de Telecomunicaciones de la CUJAE. Sus intereses de investigación versan fundamentalmente sobre la modelación de sistemas de comunicaciones ópticos inalámbricos y digitales en general. (biosca@copalnet.co.cu)

Alexis Alberto Cárdenas Barroso, Recibió el título de Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica de la Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría” CUJAE, en 2016. Desde ese mismo año labora en el Instituto Cubano de Radio y Televisión como especialista de electrónica. (acardenasbarroso@gmail.com)

Juan Orlando León Morales, Recibió el título de Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica de la Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría” CUJAE, en 2016. Desde ese mismo año labora en la empresa Solintel como especialista en soluciones de acceso. (orlanditoleonmorales@gmail.com)



Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License