

Caracterización de canal para sistemas de comunicación por luz visible en interiores

A.M. Ramirez Aguilera

U.A.S.L.P., Facultad de Ciencias, Av. Salvador Nava s/n, Zona Universitaria, C.P. 78290,
San Luis Potosí, S.L.P. México, Teléfono: (444) 826 24 91 ext. 2920
atziry@fc.uaslp.mx

J.M. Luna Rivera

U.A.S.L.P., Facultad de Ciencias, Av. Salvador Nava s/n, Zona Universitaria, C.P. 78290,
San Luis Potosí, S.L.P. México, Teléfono: (444) 826 24 91 ext. 2920
mlr@fciencias.uaslp.mx

Perez-Jimenez R.

IDeTIC, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, 35017, España,
Teléfono: (34) 928 451 000
rafael.perez@ulpgc.es

Resumen

En la actualidad, una gran parte de las actividades de investigación en el área de las comunicaciones por luz visible (VLC, por sus siglas en inglés) han sido orientadas a conocer las prestaciones del sistema de comunicación, prestando menor atención a la infraestructura de iluminación LED requerida para cada espacio físico. Bajo este contexto, en este trabajo se hace un estudio de los aspectos fundamentales en el canal de comunicación de los sistemas VLC bajo restricciones definidas por un sistema de iluminación práctico en interiores. Para el estudio se presenta la caracterización de un canal VLC utilizando el método estadístico modificado de Monte Carlo y trazado de rayos en un escenario típico de oficina. Los resultados demuestran que el número de lámparas y su distribución espacial afectan directamente al ancho de banda del canal y a la sincronización en la transmisión de datos, factores que deben ser analizados cuidadosamente antes de que esta tecnología pueda ser introducida al mercado.

Palabra(s) Clave(s): propagación de señales, sincronización, sistemas de iluminación, VLC.

1. Introducción

El creciente uso de sistemas de comunicación inalámbricos y la exigente demanda de calidad de servicio (QoS, por su siglas en inglés) han provocado explorar nuevas alternativas en el uso del espectro electromagnético. No obstante, en los últimos años los avances experimentales de las comunicaciones por luz visibles (VLC, por sus siglas en inglés) [1,2,3] han suscitado enormes expectativas que han motivado a la introducción del primer estándar para VLC denominado IEEE 802.15.7 [4]. Esta tecnología se fundamenta en la utilización de lámparas LED para transmitir información paralelamente a su aplicación usual como fuentes de iluminación.

La tecnología VLC utiliza la banda del espectro electromagnético no regulado entre 380 hasta 780nm que ofrece una enorme potencialidad de comunicaciones de alta velocidad a cortas distancias, despreocupándose de las interferencias radioeléctricas. Por otra parte, uno de los principales inconvenientes de esta tecnología es la limitación en la velocidad de transmisión para escenarios cerrados debido principalmente a los efectos de propagación de la luz visible ocasionados por las paredes y otros obstáculos. Por este motivo, para el diseño e implementación eficiente de los sistemas VLC es necesario caracterizar las condiciones de propagación del canal. Aunado a esto, no se debe de perder de vista que la función primordial de una lámpara o conjunto de lámparas es iluminar, de forma suficiente y constante, sin efectos de parpadeo y respetando las necesidades ergonómicas de los usuarios que incluye la posibilidad de gestionar la regulación de la intensidad de iluminación o ajustar la temperatura de color. Uno de los problemas poco estudiados en este tipo de sistemas son los derivados de la distribución topológica de los emisores ópticos cuando existe más de una lámpara emitiendo de forma simultánea [5]. Esto afecta la calidad de servicio al generar modificaciones en el canal de comunicaciones recibido. Cui et al. [6] han estudiado la creación de una estructura de femto-celdas que generan un modelo complejo de canal de comunicaciones. Por su parte, Tsiatmas et al. [7] han estudiado el efecto de

múltiples lámparas en una habitación, mientras otros trabajos han estudiado las características propias de la señal de excitación del LED y sus efectos sobre la señal de comunicaciones [8, 9, 10, 11].

En este trabajo se propone describir tanto los efectos de penalización sobre el canal de comunicaciones derivados de una distribución de lámparas realizada de acuerdo a criterios de iluminación, como los problemas inducidos por los posibles fallos en la sincronización entre las señales de cada lámpara, aún cuando emitan el mismo mensaje. Para la realización de este trabajo se propone hacer uso de herramientas de diseño de iluminación comercial, así como del algoritmo de Monte Carlo y trazado de rayos que será utilizado para obtener la respuesta al impulso del canal de comunicación. El análisis será realizado para sistemas con distintas longitudes de onda y considerando materiales típicos de construcción.

Este trabajo se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2 se presentan las generalidades del problema de investigación, posteriormente, la Sección 3 describe el modelo de propagación y la Sección 4 hace una descripción del escenario de aplicación propuesto para el estudio. Por último, las Secciones 5 y 6 muestran, respectivamente, los resultados obtenidos y las conclusiones del trabajo.

2. Formulación del problema

A diferencia de otros sistemas de comunicación, VLC no es diseñado exclusivamente para la transmisión de datos sino también para la iluminación. El desarrollo de esta tecnología se basa en utilizar infraestructura de iluminación LED existente a fin de reducir costos de implementación. Por todo ello, esta tecnología debe demostrar las ventajas de su integración en el sistema de iluminación existente cuya infraestructura está diseñada para proporcionar el nivel de luminosidad de acuerdo a las normas de iluminación y las necesidades de los usuarios.

Existen varios factores que se deben considerar en un diseño de iluminación para cumplir las condiciones de luminosidad en un escenario cerrado, por ejemplo, las características de las luminarias disponibles en el mercado, su ángulo de emisión y de

potencia, la geometría del escenario, ubicación de las luminarias, entre otros factores. Es posible destacar que generalmente estos requisitos se ignoran o no se consideran como parte del rendimiento y las necesidades de un enlace de datos VLC. En este sentido, este trabajo aborda el problema de la caracterización del canal de un sistema VLC integrado a las necesidades de un sistema de iluminación práctico y comercial. Para el estudio se ha planteado un entorno de simulación a modo de ejemplo, que consiste en un recinto con materiales típicos de una habitación (paredes, suelo, techo) cuya distribución de las fuentes de luz (lámparas) ha sido calculada mediante un software profesional comercial para el diseño de iluminación ambiente. Con él, se pretende analizar el efecto sobre el canal VLC de múltiples fuentes emitiendo de forma simultánea la misma información. En otros trabajos previos no se ha considerado el efecto de múltiples emisores VLC, o si los consideran, no han tenido en cuenta la disposición forzada de estos emisores y los posicionan siguiendo criterios de redes de comunicación, como la distribución de las celdas y la cobertura. Estos trabajos también suelen asumir transmisión síncrona perfecta entre las luminarias, requerimiento que es difícil de cumplir en la práctica y que puede producir importantes cambios en el canal. Aunque en este trabajo se analiza sólo el efecto del canal de comunicaciones, para mayor generalidad de los resultados, se han tomado como emisores luminarias RGB. De esta forma, en futuros trabajos se podrán considerar parámetros como temperatura de color de la iluminación y contemplar modulaciones y codificaciones multinivel.

3. Descripción del modelo de propagación

Para el desarrollo de este trabajo se elige el modelo de propagación estadístico modificado de Monte Carlo y Trazado de Rayos (MC-TR) [12]. Dicho modelo permitirá estimar las propiedades del canal VLC y con ello evaluar las condiciones del enlace de comunicación.

El método MC-TR consiste en modelar el emisor como un dispositivo que emite N rayos con orientación aleatoria definida por el diagrama de radiación de Lambert

generalizado $R_E(\theta, n)$, caracterizado por su posición, orientación y potencia de emisión P_E :

$$R_E(\theta, n) = \frac{n+1}{2\pi} P_E \cos^n(\theta), \quad (1)$$

donde $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ y n es el número modal que define el grado de direccionalidad del patrón de radiación. El receptor por su parte se caracteriza por su posición, orientación, su área física de recepción A_R y por su ángulo o campo de visión (FOV, por sus siglas en inglés - Field of View) que define el máximo ángulo de incidencia respecta a un vector normal a su superficie en el que la señal recibida puede ser detectada. Ignorando las pérdidas por reflexión, un detector tiene una área efectiva A_{ef} definida por:

$$A_{ef}(\psi) = A_R \cos(\psi) \text{rect} \left[\frac{\psi}{FOV} \right], \quad (2)$$

donde ψ es el ángulo de incidencia respecto al eje del receptor.

Para el cálculo de la respuesta al impulso del canal $h(t)$ se distingue entre dos casos posibles: con línea de vista (LOS, por sus siglas en inglés), visión directa entre transmisor y receptor $h_0(t)$; y sin línea de vista (NLOS, por sus siglas en inglés), cuando la señal alcanza al receptor después de k reflexiones $h_k(t)$:

$$h(t) = h_0(t) + h_k(t), \quad (3)$$

donde la respuesta al impulso para LOS es definida como:

$$h_0(t) = \frac{1}{d_{E,R}^2} R_E(\theta, n) A_{ef}(\psi) \delta \left(t - \frac{d_{E,R}}{c} \right); \quad (4)$$

$d_{E,R}$ es la distancia entre el emisor y receptor, δ es la función delta de Dirac y c la velocidad de propagación.

Para el cálculo de $h_k(t)$, se utiliza el modelo de Phong y cada punto de reflexión se modela como una nueva fuente de reflexión difusa y/o especular:

$$F_I(\theta_{u,R}) = P_{inc} \left\{ \frac{r_d}{\pi} \cos(\theta_{u,R}) + [1 - r_d] \frac{m+1}{2\pi} \cos^m(\theta_{u,R} - \theta') \right\}, \quad (5)$$

donde u es el número de reflexión, ρ_u es el coeficiente de reflexión, r_d el porcentaje de reflexión difusa y m la directividad de la componente especular. P_{inc} representa la potencia óptica del rayo incidente antes de experimentar k -ésima reflexión definida como:

$$P_{inc} = \frac{P_T}{N} \prod_{j=1}^{k-1} \rho_j \quad (6)$$

P_T representa la potencia total de emisión de la fuente y N es el número total de rayos de que representa a cada fuente de emisión. En cada punto de reflexión se calcula la potencia para el componente LOS y a su vez el rayo continúa su trayectoria de propagación hasta que el tiempo máximo de simulación concluya o la potencia del rayo sea menor a la potencia mínima de recepción. En cada punto de reflexión se realiza el mismo procedimiento de tal forma que:

$$\sum_{k=1}^{\infty} h_k(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{u=1}^U \frac{1}{d_{u,R}^2} F_I(\theta_{u,R}) A_{ef}(\psi_{u,R}) \delta\left(t - \left(\sum_{j=1}^k \frac{d_{j-1,j}}{c}\right) - \frac{d_{u,R}}{c}\right). \quad (7)$$

Hasta aquí, este modelo de canal es definido para componentes monocromáticos, sin embargo para el análisis de escenarios con lámparas LED, el modelo se generaliza y se extiende en función de la longitud de onda con el fin de considerar el ancho espectro de emisión de los LED. Los parámetros que varía en función de la frecuencia y que son considerados en la extensión del modelo en función de la longitud de onda son: la potencia de emisión, los coeficientes de reflexión, el porcentaje de reflexión difusa y la directividad de la componente especular. A su vez, el modelo se extiende considerando que los escenarios pueden estar iluminados con múltiples lámparas.

4. Escenario práctico de aplicación

En la Fig. 1 se presenta el escenario elegido para llevar a cabo el estudio del canal de comunicación del sistema VLC con múltiples lámparas. Este escenario es un recinto de 5m (ancho) x5m (largo) x3m(alto) con paredes y techo de yeso, diseñado para uso de oficina. Para definir el número de lámparas y su posición dentro del recinto se utilizó el software de diseño de iluminación comercial DIALux. La iluminación media sobre el plano de trabajo útil, ubicado a una altura de 0.8m del suelo, se fija a 500lx, valor típico de iluminación para estos espacios. Para llevar a cabo las simulaciones se considera el uso de lámparas con Cree CLX6A-FKB RGB LEDs cuyo espectro de emisión se muestra en la Fig. 2.

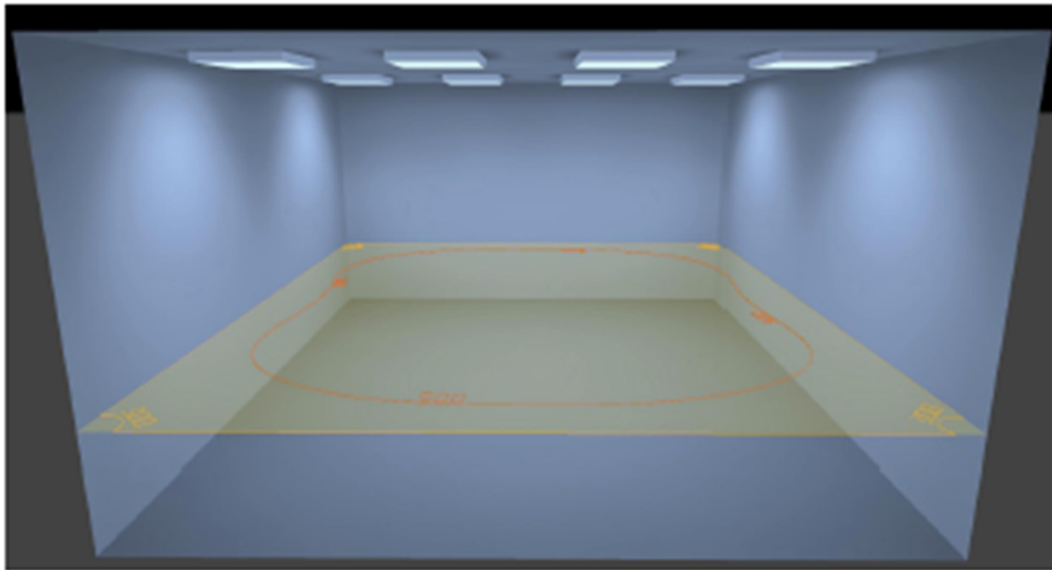


Fig. 1. Escenario de aplicación para el análisis del canal de comunicación en un sistema VLC con múltiples luminarias.

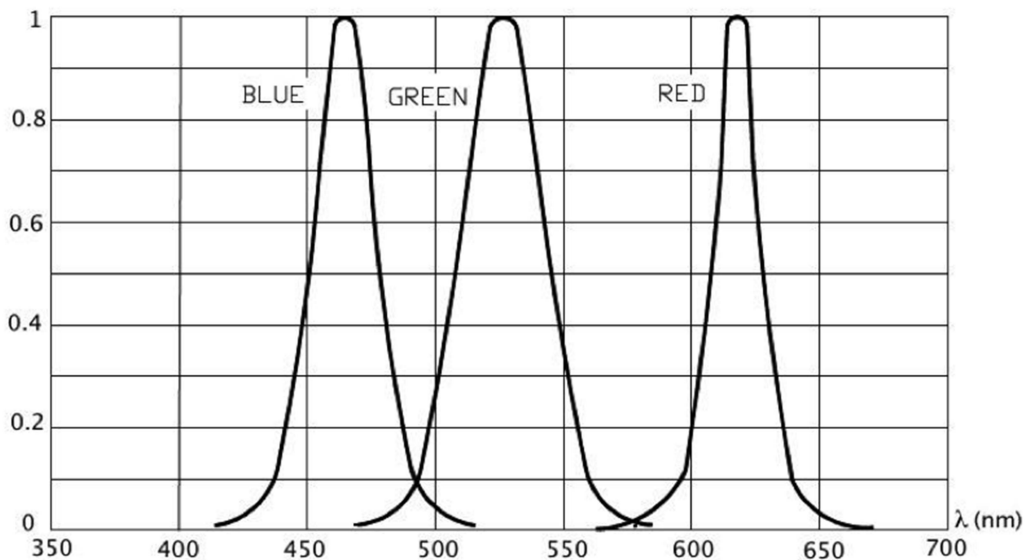


Fig. 2. Espectro de emisión para el LED RGB modelo CLX6A-FKB de la marca Cree.

En la Tabla I se resume los parámetros de simulación para el cálculo de la respuesta al impulso del canal, considerando la configuración del recinto y el sistema de iluminación propuesto en la Fig. 1. Para satisfacer la iluminación del escenario se utilizan 8 lámparas LED de 41W, posicionadas en el techo del recinto en un arreglo de 4x2. Para

la simulación se establecen 2 casos de estudio representativos con respecto a la ubicación del receptor:

- $R_1=(0.3,4.4,0.8)$, posición del receptor cerca de una de las cuatro paredes del recinto.
- $R_2=(2.5,2.5,0.8)$, posición del receptor en el centro del recinto.

Ambos receptores se encuentran a la misma altura del plano de trabajo, i.e. a 0.8m del suelo. Adicionalmente, se asume un modelo de propagación con un máximo de tres reflexiones. El receptor está determinado por su área fotosensible (Área) y su campo de vista (FOV). Por último, los valores de los coeficientes de reflexión en función de la longitud de onda para las diferentes superficies del recinto se obtiene del trabajo presentado en [13].

| | Parámetro | Valor |
|-----------------------------------|---------------|--|
| Emisor Óptico | n | 1 |
| | Posición | $E_1(0.5,1.25,3)$, $E_2(1.85,1.25,3)$ $E_3(3.1,1.25,3)$, $E_4(4.36,1.25,3)$ $E_5(0.5,3.79,3)$, $E_6(1.85,3.79,3)$ $E_7(3.1,3.79,3)$, $E_8(4.36,3.79,3)$ |
| | Orientación | Azimut: 0° Elevación : -90° |
| | Dimensiones | $0.6 \times 0.6 \text{ m}^2$ |
| | No. de LEDs | 64 |
| | Potencia | 41 W |
| Receptor | Área efectiva | 1cm^2 |
| | Posición | $R_1(0.3,4.4,0.8)$ $R_2(2.5,2.5,0.8)$ |
| | Orientación | Azimut: 0° Elevación: 90° |
| | FOV | 85° |
| Resolución | Δt | 0.2 ns |
| Reflexiones | k | 3 |
| Número de rayos por emisor | N | 50,000 |

Tabla 1. Parámetros de simulación.

5. Resultados

Una primera observación que se debe destacar al analizar los elementos prácticos del canal es que las lámparas LED están compuestas por una gran cantidad de LEDs individuales. Para nuestro caso, cada lámpara está integrada por 64 LEDs distribuidos uniformemente en una superficie de $0.6 \times 0.6 \text{m}^2$. En la Fig. 3 se muestra la respuesta al impulso para el componente LOS correspondiente a los emisores E_6 y E_8 . Sin perder generalidad, se presenta primero la respuesta al impulso de la componente LOS considerando que la lámpara emplea solamente los 4 LEDs más lejanos respecto al centro de cada lámpara (en lugar de 64). Esta consideración ayuda a reducir la cantidad de simulaciones para el presente ejemplo conservando los límites de dispersión del canal. En la Fig. 3 se presenta también la respuesta al impulso promedio (líneas continuas) LOS que se puede interpretar como un sólo LED situado en el centro de la lámpara. Estos resultados han sido obtenidos con el receptor en la posición R_2 , es decir, en el centro de la habitación. Como se puede observar, la dispersión máxima del canal está acotada por los 4 LEDs más alejados del centro de la lámpara. Por simplicidad, y aunque existe una pérdida de precisión de la medición, para el resto de esta sección se asumirá cada lámpara como una fuente puntual, es decir se considerará solamente la respuesta al impulso promedio para cada lámpara.

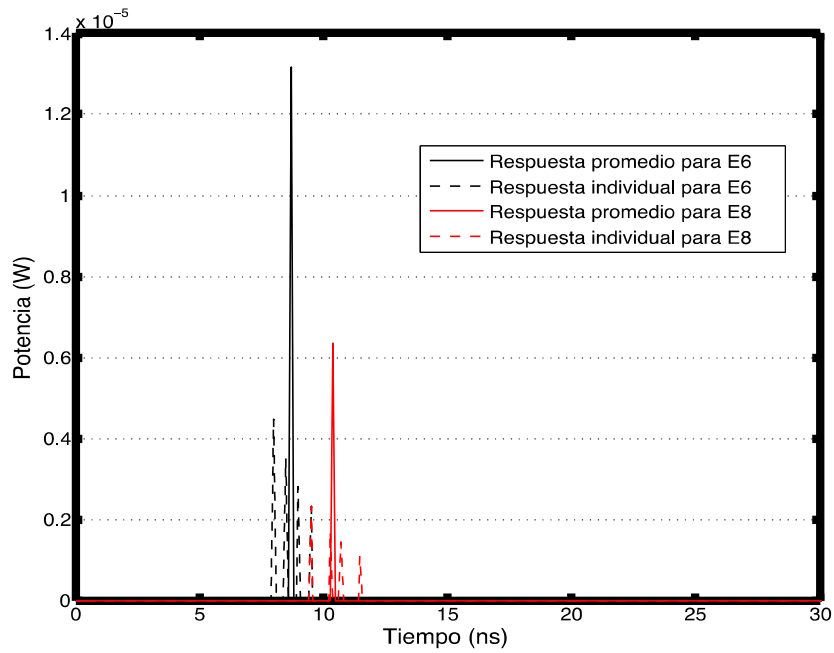


Fig. 3. Respuesta al impulso individual y promedio en LOS para las lámparas multi-LED E_6 y E_8 en R_2 .

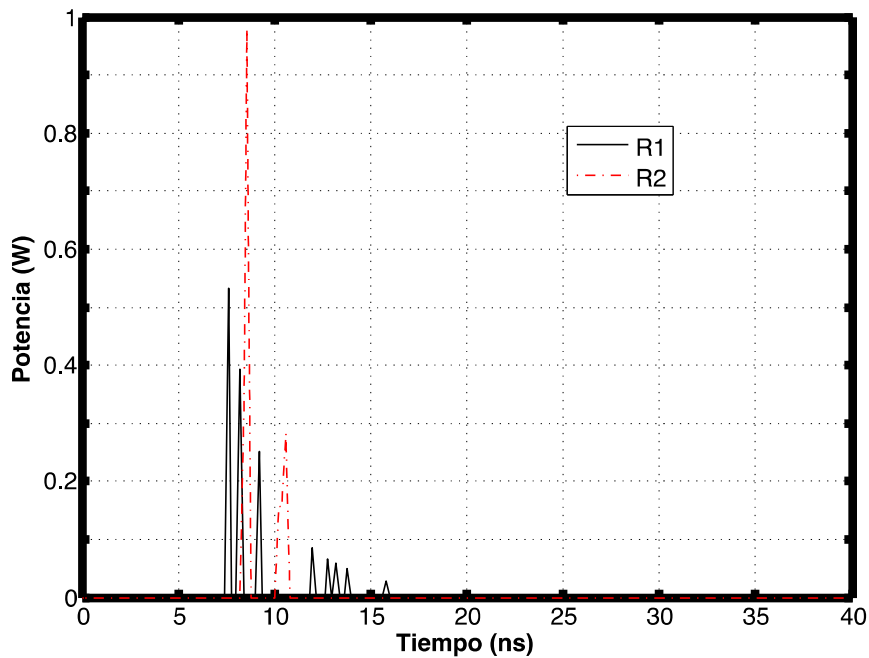


Fig. 4. Respuesta al impulso en LOS para el canal VLC con 8 lámparas LED RGB y el receptor en R_1 y R_2 .

En la Fig. 4 se muestra la respuesta del canal para el entorno LOS obtenida para R_1 y R_2 . En R_1 se distinguen con precisión 8 impulsos cuyos valores representan la potencia recibida de cada una de las lámparas. Los valores de los impulsos varían según la distancia existente entre cada luminaria y el receptor, siendo el de mayor potencia y menor retardo la más cercana. En la respuesta del canal para el caso R_2 , se puede apreciar la presencia solamente de 2 impulsos. La justificación a este comportamiento se deduce de la posición del receptor, el cuál se encuentra en el centro del recinto. La simetría en la distribución de las lámparas genera que las potencias recibidas de las 4 lámparas más cercanas, ubicadas a la misma distancia respecto al receptor, se acumulen en el impulso de mayor potencia. El mismo efecto se presenta con el grupo de 4 lámparas más alejadas del receptor, concentrándose en el impulso de menor potencia. Como se puede observar, aumentar el número de luminarias incrementa el número de componentes LOS (impulsos) que se detectan en el receptor. La Tabla II muestra los resultados de los tiempos de dispersión correspondientes a cada receptor. El RMS Delay Spread para el receptor que se encuentra en el centro presenta menor valor respecto al que se encuentra más cercano a las paredes.

| Receptor | Mean Excess Delay (ns) | RMS Delay Spread (ns) |
|-----------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| R_1 | 9.3299 | 2.1129 |
| R_2 | 9.1839 | 0.78626 |

Tabla 2. Parámetros de tiempo de dispersión.

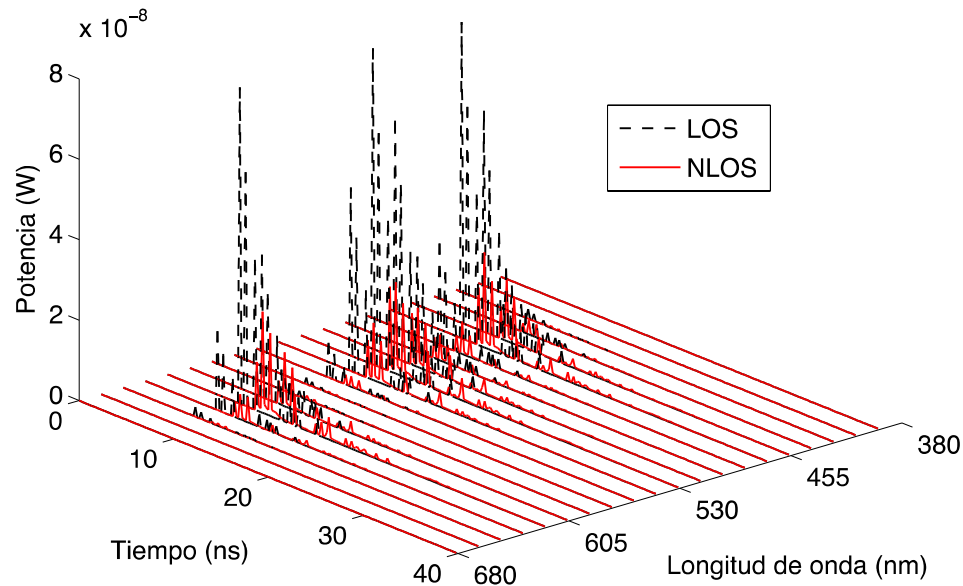


Fig. 5. Respuesta al impulso total (LOS + NLOS) del canal VLC para la posición del receptor en R_1 .

En la Fig. 5 se muestra la respuesta al impulso del canal VLC considerando las componentes de línea de vista más la componente difusa (LOS+NLOS) en el receptor R_1 en función de la longitud de onda. Se consideran 20 muestras del espectro de frecuencia y el arreglo de 4x2 lámparas LED en el recinto. Como se puede observar, existen componentes de potencia en NLOS que tienen mayor valor que algunas de las componentes LOS. Por un lado, el porcentaje de potencia promedio estimado para el receptor en las posiciones R_1 y R_2 respecto a la componente LOS son 67.3% y 80% respectivamente. Mientras que por otro lado, la contribución de potencia para R_2 en NLOS representa un menor porcentaje respecto a R_1 debido a la posición simétrica respecto a los transmisores y a que se encuentra en el centro del recinto, produciendo menor contribución las componentes difusas. De estos resultados es posible deducir con claridad que la potencia de propagación en un enlace VLC está en función de la posición de las lámparas y de los receptores en el recinto.

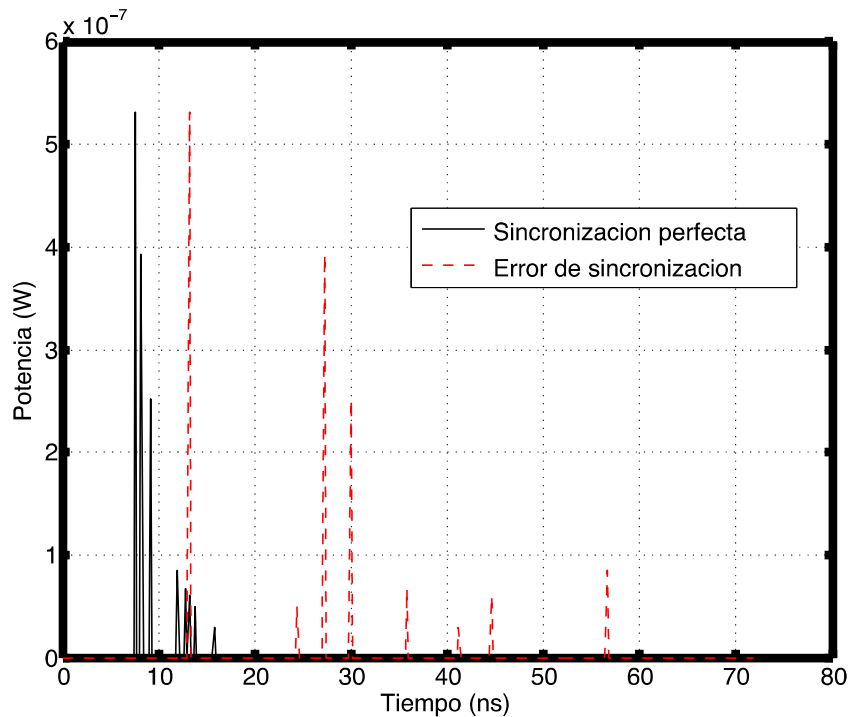


Fig. 6 Respuesta al impulso del canal VLC con y sin error de sincronización para la posición del receptor en R_1 y $\tau_{max} = 50ns$.

Por otra parte, otro factor relevante que se debe considerar debido a los múltiples emisores dentro de un recinto es el error de sincronización. Hasta ahora, los resultados han sido obtenidos bajo la suposición de que las lámparas transmiten los datos de forma síncrona, consideración difícil de lograr en la práctica debido a la distribución espacial de las lámparas. Para ejemplificar este problema, se introduce una variable aleatoria para modelar los desfases en la transmisión de cada lámpara. Esto es, el tiempo de transmisión T_l es expresado como $T_l = t + \tau_l$ donde t es la unidad de tiempo de referencia y τ_l el tiempo de desfase en la transmisión de la lámpara l , donde $l = 1, \dots, 8$. La Fig. 6 muestra el efecto del error de sincronización para la respuesta al impulso del sistema VLC con el receptor en la posición R_1 . Se asume que la variable aleatoria de retardo, $\tau_l \forall l$ son variables aleatorias independientes que están uniformemente distribuidas entre 0 y τ_{max} . Para el ejemplo mostrado en la Fig. 6, se utiliza un valor $\tau_{max} = 50ns$ que representa un valor coherente para el error de sincronización en un

sistema con un reloj de 20MHz. La presencia de errores de sincronización produce importantes cambios en la respuesta del canal, alterando la respuesta en tiempo y frecuencia del canal. Para estimar el ancho de banda del canal se utiliza la transformada de Fourier y los resultados obtenidos establecen que el canal con error de sincronización máximo de 50ns es de 16MHz, a diferencia de 262MHz que corresponde al canal cuando presenta perfecta sincronización. Evidentemente estas características deben ser consideradas en el diseño y construcción de un sistema VLC eficiente.

6. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un análisis del comportamiento del canal de comunicaciones VLC bajo las consideraciones impuestas por un sistema práctico de iluminación, asumiendo que cada lámpara LED actúa como un sistema de transmisión independiente. Se muestra que la respuesta al impulso del canal VLC depende de la distribución espacial de las lámparas LED, es decir, la distancia de separación entre ellas así como de las características de cada lámpara LED. Por otra parte, el error de sincronización que se produce en la transmisión simultánea de información producido por la distribución espacial de las lámparas afecta en el ancho de banda del canal y en la velocidad de transmisión de los datos. Por lo tanto, los resultados establecen que para mayor velocidad se requiere del apoyo de hardware adicional para minimizar el efecto del error de sincronización lo cual representa un reto importante en la implementación de los sistemas VLC.

7. Referencias

- [1] T. Komine, M. Nakagawa, "Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System using LED Lights". IEEE Transactions on Consumer Electronics. Vol. 50. No. 1. Feb. 2004. 100-107 pp.
- [2] D. C. O'Brien, G. Faulkner, H. Le Minh, O. Bouchet, M. El Tabach, M. Wolf, J. W. Walewski, S. Randel, S. Nerreter, M. Franke, K. Langer, J. Grubor, T. Kmalakis,

- “Home Access Networks using Optical Wireless Transmission”. IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Sept. 2008. 1-5 pp.
- [3] H. Burchard, N. Serafimovski, D. Tsonev, S. Videv, H. Hass, “VLC: Beyond Point-to-Point Communication”. IEEE Communications Magazine. Vol. 52. No. 7. Jul. 2014. 98-105 pp.
- [4] 802.15.7- IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light. 2011.
- [5] L. Grobe, A. Paraskevopoulos, J. Hilt, D. Schulz, F. Lassak, F. Hartlieb, C. Kottke, V. Jungnickel, K. Langer, Henrich Hertz Institute, “High-Speed Visible Light Communication Systems”. IEEE Communications Magazine. Vol. 51. No. 12. Dic. 2013. 60-66 pp.
- [6] K. Cui, J. Quan, Z. Xu, “Performance of Indoor Optical Femtocell by Visible Light Communication” Optics Communication. Jul. 2013. 59-66, 298-299 pp.
- [7] A. Tsiatmas, C.P.M.J. Baggen, F.M.J. Willems, J.P.M.G. Linnartz, J.W.M. Bergmans, “An Illumination Perspective on Visible Light Communications”. IEEE Communications Magazine, Vol. 52. No. 7. Jul. 2014. 64-71 pp.
- [8] J. Grubor, S. Randel, K. Langer, J. W. Walewski, “Broadband Information Broadcasting Using Led-Based Interior Lighting”. Journal of Lightwave Technology, Vol. 26. No. 24. Dic. 2008. 3883-3892 pp.
- [9] G. Cossu, A. M. Khalid, P. Choudhury, R. Corsini, E. Ciaramella, “3.4 Gbits/s Visible Light Optical Wireless Transmission Based on RGB LED” Journal of Lightwave Technology. Vol. 20. No. 26. Dic. 2012. B501-B506 pp.
- [10] J. B. Wang, Q. S. Hu, J. Wang, M. Chen, J. Y. Wang, “Tight Bounds on Channel Capacity for Dimmable Visible Light Communications”. Journal of Lightwave Technology. Vol. 31. No. 23. Oct. 2013. 3771-3779 pp.

- [11] Z. Zhou, C. Chen, M. Kavehrad, "Impact Analyses of Hight-Order Light Reflections on Indoor Optical Wireless Channel Model and Calibration". *Journal of Lightwave Technology*. Vol. 32. No. 10. May. 2014. 2003-2011 pp.
- [12] F. J. Lopez-Hernandez, R. Perez-Jimenez, A. Santamaria, "Ray-tracing algorithms for fast calculation of the channel impulse response on diffuse IR wireless indoor channels". *Optical Engineering*. Vol. 39. No. 10. Oct. 2000. 2775-2780 pp.
- [13] K. Lee, H. Park, J. R. Barry, "Indoor Channel Characteristics for Visible Light Communications". *IEEE Communications Letters*. Vol. 15. No. 2. Feb. 2011. 217-219 pp.
- [14] PLCC6 3-in-1 SMD LED CLP6C-FKB. Cree Inc. USA. 2011.

8. Autores

M. en C. Atziry Magaly Ramírez Aguilera recibió los grados de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica en la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ), en el 2000 y Maestro en Ciencias con especialidad en sistema digitales en el Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital (CITEDI) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) en el año 2002. Actualmente es estudiante de Doctorado en la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) en la línea de Comunicaciones Inalámbricas. Su trabajo de investigación se centra en el análisis y diseño de modelos de canal para comunicaciones en el espectro de la luz visible.

Dr. José Martín Luna Rivera recibió los grados de Ingeniero Electrónico y Maestro en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), en 1997 y 1998, respectivamente, y el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Telecomunicaciones en la Universidad de Edimburgo, Reino Unido, en 2003. Actualmente es investigador y líder del cuerpo académico de Telecomunicaciones en la UASLP. Sus principales líneas de investigación están relacionadas con la aplicación de técnicas de procesamiento de señales para la mejora de los enlaces en las redes de comunicación inalámbricas y celulares. En la actualidad su trabajo se centra en el diseño de nuevos esquemas de transmisión/recepción para los sistemas de comunicación por luz visible.

Dr. Rafael Pérez Jiménez recibió el grado de Maestro en Ciencias en la Universidad Politécnica de Madrid (1991), y el grado de Doctor en Electrónica y Telecomunicaciones en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (1995). Se unió a la Universidad de Las Palmas de Gran Canarias en 1991, donde trabaja ahora como investigador de tiempo completo. Sus principales líneas de investigación están en el campo de las comunicaciones ópticas no guiadas donde cuenta con una experiencia de más de 20 años. Esto incluye la caracterización de canales de comunicación por infrarrojo y visible para sistemas de comunicación en interiores. Actualmente es Director del Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones (IDETIC) perteneciente a la Universidad de Las Palmas de Gran Canarias.