

# Caracterización estadística del desvanecimiento inducido por dispersión en sistemas de comunicación óptica inalámbrica submarina

Pedro Salcedo-Serrano, Rubén Boluda-Ruiz, José María Garrido-Balsells, Antonio García-Zambrana

Email: {pss, rbr, jmgb, agz}@ic.uma.es

Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, Andalucía Tech, Universidad de Málaga.

Campus de Teatinos s/n, E-29071 Málaga, España.

**Resumen**—An accurate underwater channel characterization is necessary for underwater optical wireless communication (UOWC) in order to improve its current limitations. This paper presents a new statistical model to characterize the scattering effect in terms of a fading never considered before by means of a Gamma distribution by using only one degree of freedom in clear ocean and coastal waters. The developed fading model is employed to compute the performance of UOWC systems in terms of bit error rate (BER) along with salinity-induced oceanic turbulence modeled by a Weibull distribution. The results demonstrate that the scattering-induced fading effect produces a strong performance degradation particularly in long link distances and, hence, it cannot be neglected when designing advanced communication systems. The analytical results are verified by Monte Carlo simulations.

## I. INTRODUCCIÓN

El aumento de aplicaciones en entornos submarinos con fines ecológicos y económicos ha posicionado a las comunicaciones ópticas inalámbricas submarinas (*underwater optical wireless communication*, UOWC) como solución eficiente a las limitaciones de los actuales sistemas acústicos y de radiofrecuencia (RF) y a la convivencia respetuosa con el ecosistema marino, promovida desde el Pacto Verde Europeo [1]. Su alta seguridad, baja latencia y gran capacidad de transmisión de datos en el espectro de frecuencias visibles del azul y el verde (450-570 nm), hace de las UOWC una herramienta fundamental para el despliegue de las futuras redes de 6G subacuáticas junto a las aplicaciones del Internet de las cosas submarinas [2]. Sin embargo, los sistemas UOWC son afectados por la absorción y la dispersión, manifestándose no solo en forma de pérdida de potencia óptica debido a la propagación y la dispersión temporal [3], sino también en términos de un desvanecimiento de intensidad del haz óptico recibido, también conocido como *fading*. Por otro lado, estos sistemas también pueden verse comprometidos a través del fading inducido por las turbulencias oceánicas (*oceanic turbulences*, OT), generadas a su vez por variaciones en temperatura, salinidad, presión o burbujas de aire [4]. Así pues, se hace necesario un análisis del efecto combinado de la dispersión en términos de fading junto a las OT para el diseño de sistemas UOWC de altas prestaciones.

Numerosos autores han cuantificado numéricamente y experimentalmente las prestaciones de sistemas UOWC a través de distribuciones estadísticas para modelar los diferentes efectos degradantes dentro de las comunicaciones subacuáticas [5], [6] (y sus referencias). En [5], se estudia la tasa de error de

bit (*bit error rate*, BER), de un sistema UOWC en presencia de OT inducidas por salinidad. En [6], se analiza el impacto de los errores de desapuntamiento en las prestaciones de BER bajo canales de turbulencia oceánica inducidos por salinidad con interferencia intersimbólica. Sin embargo, en la literatura actual no nos consta que exista evidencia científica alguna de un posible efecto de fading inducido por la dispersión, así como de su posible impacto en las prestaciones de un sistema UOWC. Por ello, creemos necesario realizar un modelo de canal preciso que tenga en cuenta el efecto combinado del fading inducido por la dispersión y las OT, permitiendo así el desarrollo de tecnología óptica robusta en ambientes submarinos.

En este trabajo, se presenta por primera vez un efecto de fading inducido por la dispersión con el objetivo de analizar estadísticamente su impacto en la intensidad óptica recibida de un sistema UOWC con el fin de proporcionar un modelo de canal UOWC más preciso que los existentes en la literatura actual. El modelo de fading desarrollado será utilizado para evaluar las prestaciones en términos de BER asintótica para altos valores de relación señal a ruido (*signal-to-noise ratio*, SNR) de un sistema UOWC bajo diferentes condiciones de dispersión. Los resultados obtenidos en este trabajo confirman el impacto del fading inducido por dispersión a través del empeoramiento de las prestaciones de la BER, así como una significativa penalización de potencia óptica en comparación con los sistemas donde se ignora la dispersión como fuente generadora de fading. Todos los resultados presentados aquí son validados mediante simulaciones Monte Carlo.

## II. MODELADO DEL FADING INDUCIDO POR DISPERSIÓN

La propagación del haz de luz en el agua se ve afectada por la absorción,  $a(\lambda)$ , y la dispersión,  $b(\lambda)$ , cuyos efectos son caracterizados a través del coeficiente de extinción definido como  $c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) m^{-1}$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda. Bajo este contexto, se simulan 1000 realizaciones de un canal UOWC mediante una herramienta de simulación Monte Carlo presentada en [3], donde se emula la trayectoria de un número elevado de fotones en un enlace óptico submarino. En dicha herramienta, se evalúa numéricamente el impacto de la absorción y la dispersión en la respuesta al impulso de un canal UOWC. Tras el proceso de simulación de cada realización, se calcula la intensidad óptica normalizada recibida en base a los fotones recibidos. Tras ello, los datos obtenidos son organizados por medio de un histograma para represen-

TABLA I  
Parámetros de la simulación del canal UOWC.

Parámetro	Símbolo	Valor
Longitud de onda	$\lambda$	532 nm
Índice de refracción del agua	$n$	1.3
Divergencia de la fuente láser	$\theta_{div}$	10 mrad
Diámetro de apertura del receptor	D	5 mm
Campo de visión del receptor ( <i>field of view</i> )	FOV	180°

tar la función densidad de probabilidad (*probability density function*, PDF) de la intensidad óptica recibida normalizada.

Desde un punto de vista estadístico, se modela la variación de la intensidad óptica recibida mediante una variable aleatoria que sigue una distribución Gamma, debido a su excelente comportamiento en numerosos problemas de propagación, como se indica en [7], tal que

$$f_{h_S}(h) = \frac{\sigma_S^{-2}/\sigma_S^2 h^{1/\sigma_S^2 - 1}}{\Gamma(1/\sigma_S^2)} e^{-h/\sigma_S^2}, \quad h \geq 0, \quad (1)$$

donde  $\Gamma(\cdot)$  es la función Gamma,  $h$  es la fluctuación aleatoria de la intensidad del rayo óptico recibido, y  $\sigma_S^2$  representa la fuerza de este nuevo efecto de fading. El parámetro  $\sigma_S^2$  es calculado usando un criterio no lineal de mínimos cuadrados. Los parámetros de la simulación son resumidos en la Tabla I. En la Fig. 1, se puede observar como el modelo propuesto se ajusta de forma precisa a los histogramas bajo los diferentes escenarios simulados vía Monte Carlo, sin distinción del tipo de agua o la distancia de enlace. Para evaluar la validez del ajuste se hace uso del coeficiente de determinación,  $R^2$ , del que se obtiene un valor superior a 0.9 en todas las simulaciones representadas, pese a que el modelo solo posee un grado de libertad. De acuerdo con los resultados, cabe señalar la existencia de una fluctuación notable en la irradiancia del rayo óptico en recepción a causa del efecto de dispersión, altamente dependiente de la distancia de enlace y la turbidez del agua. Destacar el severo impacto para distancias de enlace moderadas y largas, a pesar de la utilización de una fuente láser, aún más notable en aguas más turbias, como el agua de costa, respecto a las simulaciones realizadas en agua de océano claro. Con el objetivo de estudiar la relación del fading con la distancia, se modela el parámetro  $\sigma_S^2$  a partir de un comportamiento exponencial expresado como  $\sigma_S^2(d) \simeq k_1 e^{k_2 d}$ , donde  $k_1$  y  $k_2$  son obtenidos a través de un ajuste de curva y validados vía Monte Carlo.

### III. MODELOS DE SISTEMA Y DE CANAL

Se considera un sistema UOWC basado en un esquema de modulación de intensidad y detección directa (IM/DD), donde se adopta una modulación on-off keying (OOK) equiprobable por su simplicidad y bajo coste. La fotocorriente recibida es calculada como  $y = hR_p x + z$ , donde  $R_p$  es la responsividad del fotodetector medida en amperios por vatio,  $A/W$ , que se asume la unidad,  $x$  es la potencia óptica transmitida,  $h$  es la ganancia de fading del canal, y  $z$  es el ruido AWGN aditivo de media cero y varianza  $\sigma^2 = N_0/2$ . Con el fin de obtener un modelo de canal realista, definimos el coeficiente de fading como  $h = L \cdot h_S \cdot h_o$ , donde  $L$  representa las pérdidas de potencia debido a la propagación del haz de luz,  $h_S$  es el fading inducido por dispersión y  $h_o$  es el fading inducido por OT. Para el modelado del fading inducido por OT utilizamos

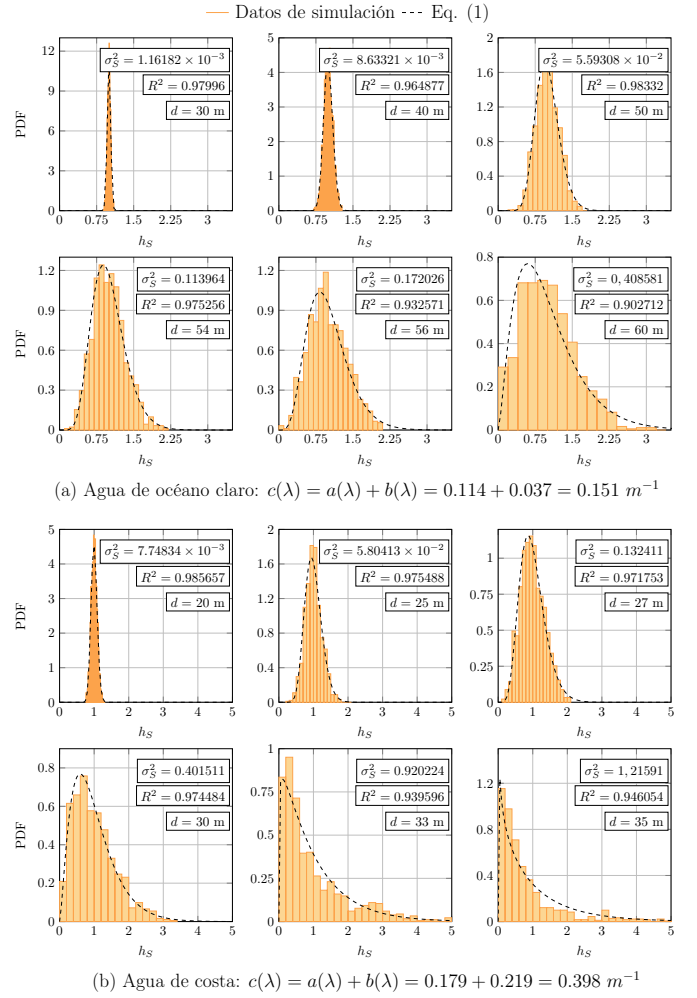


Fig. 1. Ajuste de la distribución Gamma con el correspondiente histograma de los datos simulados bajo diferentes condiciones de dispersión, (a) agua de océano claro, y (b) agua de costa, para diferentes distancias de enlace.

la distribución Weibull, debido a su buen rendimiento en un amplio rango de niveles de turbulencias presentes en mares y océanos [4], descrita como

$$f_{h_o}(h) = \frac{\beta_1}{\beta_2} \left( \frac{h}{\beta_2} \right)^{\beta_1 - 1} \times e^{-\left( \frac{h}{\beta_2} \right)^{\beta_1}}, \quad h \geq 0, \quad (2)$$

donde  $\beta_1 > 0$  y  $\beta_2 > 0$  son los parámetros relacionados con el índice de centelleo del efecto de fading y el valor medio de la irradiancia, respectivamente. El valor del índice de centelleo, usado como indicador de la fuerza de las turbulencias, puede ser obtenido a partir del parámetro  $\beta_1$  como se indica en [4]

$$\sigma_{h_o}^2 = \frac{\Gamma(1 + 2/\beta_1)}{\Gamma(1 + 1/\beta_1)^2} - 1. \quad (3)$$

Asumiendo propagación de onda plana, definimos el índice de centelleo como en [7]

$$\sigma_{h_o}^2(d) = 8\pi dk^2 \times \int_0^1 \int_0^\infty \kappa \Phi_n(\kappa) \left\{ 1 - \cos \left( \frac{d\kappa^2}{k} \xi \right) \right\} d\kappa d\xi, \quad (4)$$

donde  $k$  es el número de onda y  $\Phi_n(\kappa)$  es el espectro de potencia de las OT, definido aquí como el espectro de potencia presentado por Nikishov en [8]. Este espectro depende, entre

otros parámetros, de  $w$ , definido como la fuerza relativa de las fluctuaciones de temperatura y salinidad, cuyo valor se encuentra entre  $[-5, 0]$ . Los valores del resto de parámetros son similares a los obtenidos en [9], asumiendo un medio isotrópico y homogéneo en cuanto a temperatura y salinidad.

#### A. Modelo de fading combinado

La PDF del canal con fading combinado por dispersión y OT se expresa como

$$f_h(h) = \int_{h/L}^{\infty} f_{h|h_S}(h|h_S) f_{h_S}(h_S) dh_S, \quad (5)$$

donde  $f_{h|h_S}(h|h_S)$  es la probabilidad condicional dado un estado de fading inducido por la dispersión  $h_S$ . Debido a la complejidad de la expresión anterior, se propone un análisis asintótico para obtener una solución en forma cerrada que nos permita estudiar de manera más sencilla las prestaciones de un sistema UOWC a alta SNR y su relación con los parámetros anteriormente presentados. Las expresiones asintóticas de  $f_{h_S}(h)$  y  $f_{h_o}(h)$  son aproximadas como en [10] como sigue

$$f_{h_S}(h) \doteq \frac{\sigma_S^{-2/\sigma_S^2}}{\Gamma(1/\sigma_S^2)} h^{1/\sigma_S^2 - 1}. \quad (6)$$

$$f_{h_o}(h) \doteq \frac{\beta_1}{\beta_2^{-\beta_2}} h^{\beta_1 - 1}. \quad (7)$$

Sustituyendo Eqs. (6) y (7) en Eq. (5), realizando algunas manipulaciones algebraicas y haciendo uso de [11, Eq. (3.471.7)], se obtiene la PDF combinada de  $h$  como sigue

$$f_h(h) \doteq \begin{cases} \frac{\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta_1 \sigma_S^2}\right)}{(L\beta_2 \sigma_S^2)^{\frac{1}{\sigma_S^2}} \Gamma\left(\frac{1}{\sigma_S^2}\right)} h^{\frac{1}{\sigma_S^2} - 1}, & \frac{1}{\sigma_S^2} < \beta_1, \quad h \geq 0. \\ \frac{\beta_1 \Gamma\left(\frac{1}{\sigma_S^2} - \beta_1\right)}{(L\beta_2 \sigma_S^2)^{\beta_1} \Gamma\left(\frac{1}{\sigma_S^2}\right)} h^{\beta_1 - 1}, & \frac{1}{\sigma_S^2} > \beta_1, \quad h \geq 0. \end{cases} \quad (8)$$

#### IV. ANÁLISIS DE LA TASA DE ERROR DE BIT (BER)

En esta sección se analizan las prestaciones de un sistema UOWC en términos de BER bajo el modelo de canal presentado. Asumiendo símbolos equiprobables y que la información del estado del canal es conocida en recepción, la BER,  $P_b$ , se puede definir como  $P_b = Q(\sqrt{2\gamma} \cdot L \cdot h)$ , donde  $Q(\cdot)$  es la función  $Q$  gaussiana,  $\gamma = P_t^2 R_p T_b / N_0$  es la SNR eléctrica normalizada en recepción en ausencia de fading,  $P_t$  es la potencia óptica media transmitida y  $T_b$  el periodo de bit. Por tanto,  $P_b$  se obtiene promediando bajo la PDF combinada  $f_h(h)$  como sigue

$$P_b = \int_0^{\infty} Q(\sqrt{2\gamma} \cdot L \cdot h) \cdot f_h(h) dh. \quad (9)$$

Aplicando la definición asintótica anterior de  $f_h(h)$ , las prestaciones de la BER a alta SNR tienden a  $P_b \doteq (G_c \gamma)^{-G_d}$ , donde  $G_d$  y  $G_c$  representan el orden de diversidad y la ganancia de codificación, respectivamente. Sustituyendo Eq. (8) en Eq. (9) y aplicando la relación entre la función  $Q(\cdot)$  y la función de error complementario  $\text{erfc}(\cdot)$ , se resuelve la integral a partir de [12, Eq. (2.8.5.2)], resultando en la siguiente expresión

$$P_b \doteq \begin{cases} \frac{\sigma_s^2 \Gamma\left(1 - \frac{1}{\sigma_s^2 \beta_1}\right)}{(2L\beta_2 \sigma_s^2)^{\frac{1}{\sigma_s^2}} \Gamma\left(\frac{1}{2\sigma_s^2}\right)} \gamma^{-\frac{1}{2\sigma_s^2}}, & \frac{1}{\sigma_s^2} < \beta_1. \\ \frac{\Gamma\left(\frac{\beta_1 + 1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{1}{\sigma_s^2} - \beta_1\right)}{2\sqrt{\pi} (L\beta_2 \sigma_s^2)^{\beta_1} \Gamma\left(\frac{1}{\sigma_s^2}\right)} \gamma^{-\frac{\beta_1}{2}}, & \frac{1}{\sigma_s^2} > \beta_1. \end{cases} \quad (10)$$

A partir de la expresión anterior se puede obtener el valor del orden de diversidad como  $G_d = \min\left(\frac{1}{\sigma_s^2}, \beta_1\right) / 2$ . Con este término se puede determinar cuál es el efecto dominante sobre las prestaciones de la BER a alta SNR para un determinado escenario. Se dirá que la dispersión es dominante cuando se cumpla la condición de  $\frac{1}{\sigma_s^2} < \beta_1$ , mientras que las OT dominarán las prestaciones del sistema en caso contrario.

#### V. RESULTADOS NUMÉRICOS

En esta sección, se evalúan las prestaciones de un sistema UOWC con el modelo de fading inducido por dispersión en canales turbulentos inducidos por salinidad y diferentes condiciones de dispersión. Los principales parámetros utilizados en la simulación se resumen en la Tabla I. Sin pérdida de generalidad, suponemos un valor de  $L = 1$ . En las Fig. 2(a) y Fig. 2(b) se evalúa y verifica vía simulación Monte Carlo la expresión de la BER asintótica obtenida en Eq. (10) para agua de océano claro y agua de costa, respectivamente, asumiendo un nivel de turbulencia de  $w = -3$  para diferentes distancias de enlace. Además, se representa la BER en línea discontinua cuando se ignora el fading inducido por dispersión. En primer lugar, señalar el buen ajuste de la expresión asintótica con la simulación Monte Carlo, lo que confirma la precisión y la utilidad de los resultados asintóticos. Como se observa en el desplazamiento a la derecha de los resultados obtenidos en simulación y la Eq. (10) respecto a los cálculos donde se ignora el fading dispersivo, el impacto de éste puede llegar a ser significativo a medida que crece la distancia de enlace. Este impacto puede verse incrementado a distancias menores en entornos más turbios, como se observa en la Fig. 2(b). En la Fig. 3(a) se representa el orden de diversidad en función de la distancia de enlace para agua de costa. Se aprecia como las OT dominan las prestaciones de la BER a alta SNR para enlaces de corta y moderada distancia, es decir, cuando se cumple la condición  $\beta_1 < \frac{1}{\sigma_s^2}$ . Hay que señalar que para niveles menores de  $w$ , la distancia a partir la cual el fading inducido por dispersión domina, aumenta. Esto puede ser debido a que valores de  $w$  cercanos a 0 suelen representar niveles de turbulencia más fuertes, lo que provoca que el impacto de la dispersión en las fluctuaciones de la intensidad óptica recibida sea menor, y sea necesario una distancia de enlace mayor para que la dispersión provoque una degradación en las prestaciones. En segundo lugar, teniendo en cuenta la ganancia de codificación definida previamente, analizamos el fading inducido por dispersión como una penalización de potencia óptica (PPO) en la BER respecto al mismo escenario en ausencia de fading dispersivo. Para ello, a partir de la definición de ganancia de codificación y la Eq. (10), calculamos el PPO como

$$\text{PPO}[\text{dB}] = -\frac{20}{\beta_1} \log_{10} \left[ \frac{\Gamma\left(\frac{1}{\sigma_s^2} - \beta_1\right)}{\sigma_s^{2\beta_1} \Gamma\left(\frac{1}{\sigma_s^2}\right)} \right]. \quad (11)$$

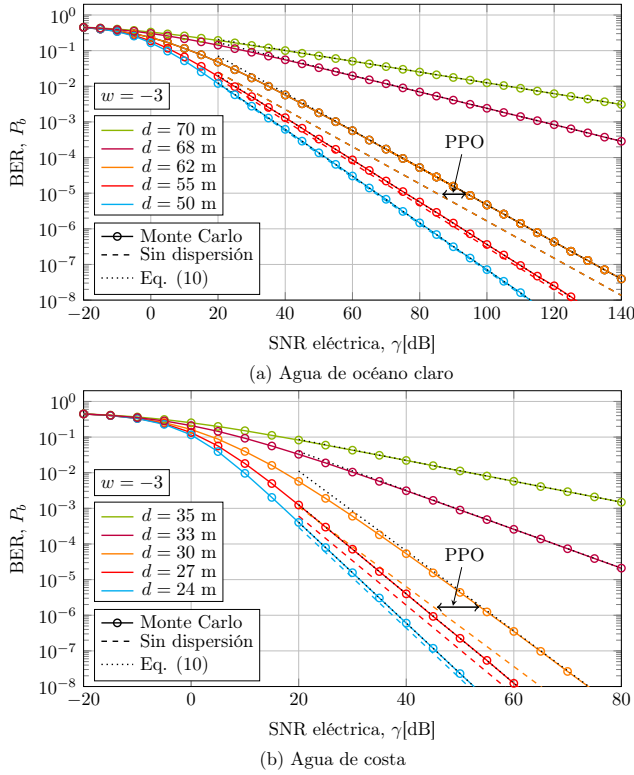


Fig. 2. BER para (a) agua de océano claro y (b) agua de costa bajo un canal fading inducido por dispersión junto a OT inducidas por salinidad con un  $w = -3$  cuando diferentes distancias son asumidas.

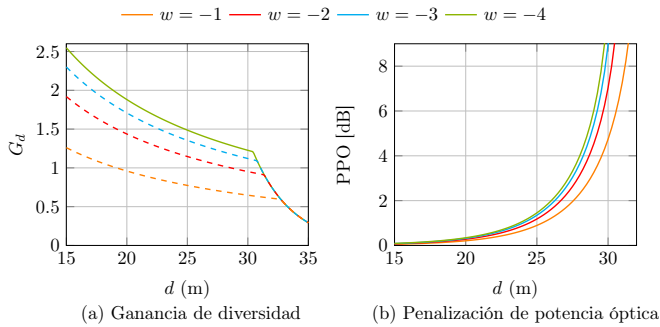


Fig. 3. (a) Orden de diversidad y (b) penalización por potencia óptica en función de la distancia de enlace para diferentes OT con valores de  $w = \{-1, -2, -3, -4\}$  en agua de costa según Eq. (11).

En la Fig. 3(b), se evalúa la expresión anterior para diferentes escenarios de OT en agua de costa. Es fácilmente reconocible el comportamiento exponencial de la degradación de las prestaciones del sistema a medida que la distancia de enlace aumenta, siendo similar para todos los valores de  $w$ . De esta figura deducimos que un incremento insignificante en la distancia de enlace puede producir una severa degradación en las prestaciones de un sistema UOWC. De acuerdo con la Fig. 3(b), un aumento de 5 metros en la distancia de enlace, entre 25 m y 30 m, para un valor de  $w = -3$ , supone un empeoramiento de 8 dB en las prestaciones de la BER de un sistema UOWC en agua de costa.

## VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se han analizado las prestaciones de un sistema UOWC en términos de BER asintótica sobre un nuevo modelo de canal UOWC en presencia de un fading inducido

por dispersión cuando turbulencias oceánicas inducidas por salinidad son contempladas. El modelo de canal así como las expresiones de BER obtenidas han sido verificadas por simulaciones Monte Carlo tanto para agua de océano claro como agua de costa. Teniendo en cuenta los resultados presentados aquí, podemos concluir que el fading inducido por dispersión debe ser tenido en cuenta en un análisis preciso de prestaciones de sistemas UOWC, ya que presenta un notable impacto en términos de BER en el diseño de enlaces de moderada y larga distancia, así como en enlaces de distancias menores bajo condiciones de aguas turbias. El análisis del impacto del fading inducido por dispersión con la distancia revela que un ligero aumento en la distancia de enlace provoca un grave empeoramiento de las prestaciones del sistema. Este trabajo aporta un nuevo entorno de trabajo para caracterizar de forma más precisa los fenómenos oceánicos, así como para el diseño de futuros sistemas UOWC de larga distancia.

Finalmente, como trabajo futuro planeamos validar los resultados teóricos experimentalmente bajo condiciones de laboratorio.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación bajo el proyecto PID2019-107792GB-I00 y el Programa I+D+i FEDER Andalucía 2014-2020 bajo el proyecto P18-RTJ-3343.

## REFERENCIAS

- [1] Z. Zeng, S. Fu, H. Zhang, Y. Dong, and J. Cheng, "A survey of underwater optical wireless communications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 204–238, 2017.
- [2] F. Guo, F. R. Yu, H. Zhang, X. Li, H. Ji, and V. C. M. Leung, "Enabling massive IoT toward 6G: A comprehensive survey," *IEEE Internet of Things Journal*, pp. 1–1, 2021.
- [3] R. Boluda-Ruiz, P. Rico-Pinazo, B. Castillo-Vázquez, A. García-Zambrana, and K. Qaraqe, "Impulse Response Modeling of Underwater Optical Scattering Channels for Wireless Communication," *IEEE Photonics Journal*, pp. 1–14, 2020.
- [4] M. V. Jamali, A. Mirani, A. Parsay, B. Abolhassani, P. Nabavi, A. Chizari, P. Khorramshahi, S. Abdollahramezani, and J. A. Salehi, "Statistical studies of fading in underwater wireless optical channels in the presence of air bubble, temperature, and salinity random variations," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 10, pp. 4706–4723, 2018.
- [5] A. Jurado-Navas, N. G. Serrato, J. M. Garrido-Balsells, and M. Castillo-Vázquez, "Error probability analysis of OOK and variable weight MPPM coding schemes for underwater optical communication systems affected by salinity turbulence," *OSA Continuum*, vol. 1, no. 4, pp. 1131–1143, 2018.
- [6] R. Boluda-Ruiz, A. García-Zambrana, B. Castillo-Vázquez, and S. Hranilovic, "Impact of angular pointing error on BER performance of underwater optical wireless links," *Opt. Express*, vol. 28, no. 23, pp. 34 606–34 622, 2020.
- [7] L. C. Andrews and R. L. Phillips, *Laser beam propagation through random media*. SPIE press Bellingham, WA, 2005, vol. 1.
- [8] V. V. Nikishov and V. I. Nikishov, "Spectrum of turbulent fluctuations of the sea - water refraction index," *International Journal of Fluid Mechanics Research*, vol. 27, no. 1, 2000.
- [9] O. Korotkova, N. Farwell, and E. Shchepakina, "Light scintillation in oceanic turbulence," *Waves in Random and Complex Media*, vol. 22, no. 2, pp. 260–266, 2012.
- [10] Z. Wang and G. B. Giannakis, "A simple and general parameterization quantifying performance in fading channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, no. 8, pp. 1389–1398, 2003.
- [11] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of integrals, series and products*, 7th ed. Academic Press Inc., 2007.
- [12] A. P. Prudnikov, Y. A. Brychkov, and O. I. Marichev, *Integrals and series Volume 2: Special Functions*, 1st ed. Gordon and Breach Science Publishers, 1986, vol. 2.