

# An Opportunistic System to Counteract Fading and Gaussian Interference Effects Under Different Modulation Schemes

Nathaly Verónica Orozco Garzón, Henry Ramiro Carvajal Mora and Celso de Almeida

**Abstract**— In this paper we propose an opportunistic transmission in which the fading characteristics and interference are considered. The opportunism is considered in the sense that transmissions are made just when the fading amplitude is above a threshold value. For this opportunistic system, it is considered that the estimated fading is sent through a feedback link using channel state information (CSI). Thereby, the receiver indicates to the transmitter when it should transmit. To analyze the performance of the opportunistic system, we consider the presence of additive white Gaussian noise, flat and slow Rayleigh fading and co-channel interference. The performance analysis is based on the mean bit error rate as a function of the signal-to-noise ratio for different modulation schemes. For this, analytical expressions are established. The accuracy of these expressions is verified by Monte-Carlo simulations. Moreover, a comparison between the opportunistic system and an ordinary system is made in terms of the mean bit error rate.

**Index Terms**— Cellular System, Co-Channel Interference, Opportunistic System, Rayleigh Fading Channel.

## I. INTRODUCCIÓN

**D**EBIDO al incremento significativo del número de usuarios y a la demanda actual de altas tasas de transmisión en comunicaciones inalámbricas, investigaciones en este ámbito son necesarias con el fin de garantizar calidad en los servicios y aplicaciones [1]. El desempeño de sistemas inalámbricos es principalmente afectado por la presencia de desvanecimiento en el canal de transmisión [2]. Otro parámetro que también afecta considerablemente el desempeño de los sistemas celulares es la interferencia de co-canal, sus efectos son discutidos en [3-6].

Algunos estudios determinan que es posible estimar la amplitud del desvanecimiento en un canal inalámbrico con alto grado de confiabilidad [7-8]. Por otra parte, diferentes trabajos suponen que la información del estado del canal es conocida con el fin de adaptar la transmisión actual a las características del canal [9-11]. Por este motivo, se puede considerar en algunos casos que la estimación del canal es perfecta.

En la actualidad existen varios artículos que han propuesto transmisiones oportunistas de diferente índole como un mecanismo para mejorar el desempeño del sistema. En [12-13] se emplea canales de frecuencias que no son usados durante ciertos intervalos de tiempo para transmitir de manera oportunista.

Nathaly V. Orozco y Henry R. Carvajal están con la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (FICA), Universidad de las Américas (UDLA), Quito, Ecuador (e-mails: nathaly.orozco@udla.edu.ec, henry.carvajal@udla.edu.ec). Celso de Almeida está con la Facultad de Ingeniería Eléctrica y de Computación de la Universidad Estatal de Campinas (UNICAMP), Campinas, Brasil (e-mail: celso@decom.fee.unicamp.br).

Existe otra técnica oportunista encontrada en la literatura denominada como diversidad multiusuario, en esta técnica el usuario con mayor amplitud de desvanecimiento realiza la transmisión a través del canal de comunicaciones [14-15].

A diferencia de los trabajos citados, el presente trabajo busca contrarrestar los efectos destructivos del canal a través de un método de transmisión oportunista. Se considera la presencia de múltiples interferentes. Este esquema permite mejorar significativamente el desempeño del sistema y ser menos vulnerable a los efectos de la interferencia. La idea principal de la transmisión oportunista propuesta es transmitir solo cuando la amplitud del desvanecimiento es mayor a un umbral. Un enlace de realimentación es considerado para establecer la comunicación entre el receptor y el transmisor utilizando la información del estado del canal.

A conocimiento de los autores, no existe ningún trabajo semejante relacionado con el sistema oportunista propuesto y mucho menos analizando en entornos donde la interferencia puede ser aproximada como Gaussiana.

El presente artículo está estructurado de la siguiente manera. La descripción del canal y del sistema son presentados en la sección II. En la sección III, se desarrolla el análisis del desempeño del sistema oportunista en un canal con desvanecimiento Rayleigh. En la sección IV, el análisis del desempeño del sistema oportunista considerando múltiples interferentes de co-canal es realizado. Los resultados numéricos son presentados en la sección V. Finalmente, las conclusiones del trabajo son presentadas en la sección VI.

## II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En esta sección se describe el sistema analizado.

### A. Descripción del Transmisor y del Receptor

Se considerarán dos escenarios empleando el sistema oportunista propuesto. En primer lugar, se considerará un canal con desvanecimiento de tipo Rayleigh y después se incluirá interferencia de co-canal. Se considerará que esta interferencia es generada por un número grande de usuarios, por lo tanto, invocando al teorema del límite central, es posible modelar esta interferencia como una variable aleatoria Gaussiana.

Para una visión general del sistema, su diagrama de bloques es mostrado en la Fig. 1. El usuario de interés y los usuarios interferentes generan bits de información aleatorios, los cuales asumen valores 0 y 1 con igual probabilidad. Después estos bits son mapeados en un símbolo complejo ( $x$ ) empleando

codificación Gray. Luego, estos símbolos son almacenados en un buffer hasta que la transmisión es permitida. El equivalente pasa bajos de la señal transmitida por el usuario de interés (usuario 0) es dado por

$$S_0(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A' x_{0,k} g(t - kT'_s), \quad (1)$$

donde  $A'$  es la amplitud de la señal transmitida,  $g(t)$  es el formato de pulso con energía unitaria,  $T'_s$  es el período de símbolo.

Los usuarios interferentes transmiten bajo las mismas condiciones y características del usuario de interés. El equivalente pasa bajos de la señal transmitida por un usuario interferente (usuario 1) es

$$S_1(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \rho A' x_{1,k} g(t - kT'_s), \quad (2)$$

donde  $\rho$  es el factor de amplitud del interferente, usado para variar la relación señal-interferencia.

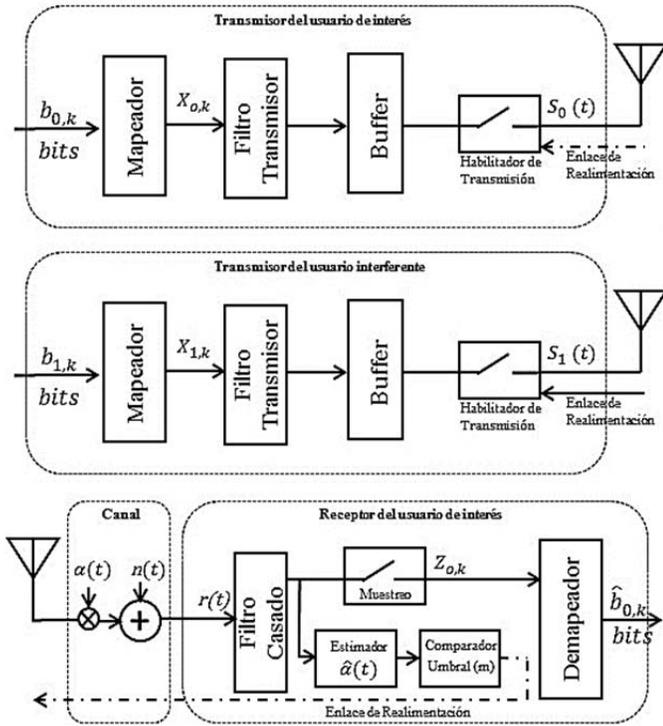


Fig. 1. Modelo del Sistema.

**B. Modelo de Canal**

En el canal se considera la presencia de ruido AWGN (del inglés *Additive White Gaussian Noise*) junto con desvanecimiento plano y lento con distribución Rayleigh, cuya función densidad de probabilidad (PDF) es definida por [16]

$$f_{\alpha}(\alpha) = \frac{\alpha}{\sigma^2} e^{-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}}, \quad \alpha \geq 0. \quad (3)$$

**C. Mecanismo de Transmisión Oportunista**

La Fig. 2 muestra el mecanismo de transmisión oportunisto empleado, donde el usuario transmite solamente cuando la amplitud del desvanecimiento está encima de un umbral  $m$ . Para esto, el receptor informa al transmisor a través de un enlace de realimentación. Por otro lado, si la amplitud del desvanecimiento está abajo del umbral  $m$ , entonces el usuario no transmite.

A seguir vamos a demostrar que el valor del umbral está relacionado con la probabilidad de transmisión deseada  $q$ . Si  $q = 1$ , el sistema siempre transmite continuamente, lo que es equivalente a un sistema ordinario. El periodo de silencio o probabilidad de no transmisión es  $p = 1 - q$ . La probabilidad de no transmisión puede ser obtenida integrando (3), desde 0 a  $m$ , esto es

$$p = \int_0^m \frac{\alpha}{\sigma^2} e^{-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}} d\alpha = 1 - e^{-\frac{m^2}{2\sigma^2}}. \quad (4)$$

A partir de (4) es posible obtener el valor del umbral  $m$  en función de la probabilidad de transmisión  $q$ , así,

$$m = \sqrt{2\sigma^2 \ln\left(\frac{1}{q}\right)}. \quad (5)$$

Con el fin de compensar los periodos de no transmisión, es necesario incrementar la tasa de transmisión durante un período de símbolo de acuerdo a la probabilidad de transmisión escogida.

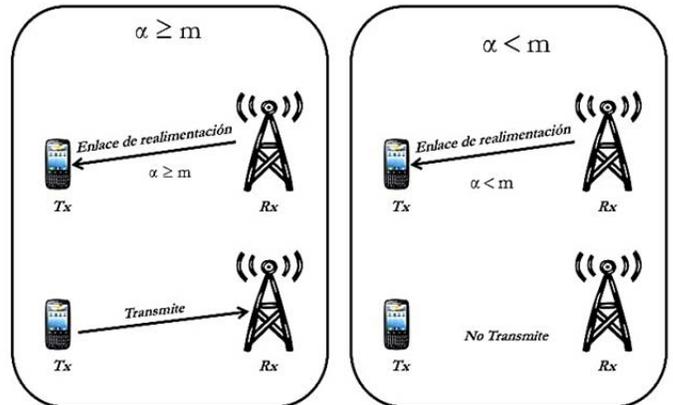


Fig. 2. Mecanismo de Transmisión Oportunista

**D. Transmisión Oportunista en Presencia de Interferencia de Co-Canal**

Para el análisis de la transmisión oportunisto en presencia de interferencia de co-canal pueden ocurrir los siguientes escenarios de operación:

- Si la amplitud del desvanecimiento del usuario de interés está abajo del umbral, el usuario de interés no transmite. Por lo tanto, la interferencia es irrelevante.
- La amplitud del desvanecimiento del usuario de interés está sobre el umbral y la amplitud del desvanecimiento del usuario interferente está abajo del umbral. En este caso no hay interferencia ya que el interferente no transmite.
- Finalmente, el escenario en el cual la amplitud del desvanecimiento de ambos usuarios está encima del umbral. En este caso hay interferencia de co-canal porque ambos usuarios transmiten.

### III. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO EN UN CANAL CON DESVANECIMIENTO

En esta sección evaluaremos el desempeño del sistema oportunista mostrado en la Fig. 1, considerando un canal con desvanecimiento. El desempeño se evalúa en términos de probabilidad de error de bit media como una función de la relación señal-ruido (SNR).

#### A. Relación Señal a Ruido

En términos generales, la relación señal-ruido es la relación entre la potencia de una señal deseada para la potencia del ruido, con frecuencia expresada en decibeles. Así, tenemos que, en la presencia del desvanecimiento, la SNR es definida como

$$\gamma_b = \alpha^2 \frac{E_b}{N_0}, \quad (6)$$

donde  $E_b/N_0 = A^2 T_b' / 2N_0$  es la relación entre la energía por bit y la densidad espectral de potencia del ruido. Además, en el sistema oportunista consideramos que  $\bar{\alpha}^2$  representa la potencia media del desvanecimiento. Este factor puede ser obtenido usando la condición de que la transmisión ocurre solamente si  $\alpha \geq m$ , es decir

$$\bar{\alpha}^2 = \frac{1}{q} \int_m^\infty \alpha^2 \frac{\alpha}{\sigma^2} e^{-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}} d\alpha = 2\sigma^2 + m^2. \quad (7)$$

Así, es posible obtener que para el sistema oportunista la relación señal-ruido es dada por

$$\bar{\gamma}_b = (m^2 + 2\sigma^2) \frac{E_b}{N_0}. \quad (8)$$

#### B. Probabilidad de Error de Bit Media

La probabilidad de error de símbolo media para el sistema oportunista puede ser calculada como una función del umbral escogido. Para este cálculo empleamos que el desvanecimiento está condicionado a que  $\alpha \geq m$ . Por lo tanto,  $\bar{P}_s$  es dado por

$$\bar{P}_s = \int_m^\infty P_{(s|\alpha)}(\alpha) f_\alpha(\alpha | \alpha > m) d\alpha, \quad (9)$$

donde  $P_{(s|\alpha)}(\alpha)$  es la probabilidad de error de símbolo condicionada al valor instantáneo del desvanecimiento y la PDF condicionada  $f_\alpha(\alpha | \alpha > m)$  puede ser escrita como [17]

$$f_\alpha(\alpha | \alpha > m) = \frac{f_\alpha(\alpha)}{1 - F_\alpha(m)}, \quad \text{para } m \leq \alpha < \infty, \quad (10)$$

donde,  $F_\alpha(m) = P(\alpha \leq m) = p$  es la función de distribución acumulativa (CDF) y representa la probabilidad de no transmisión. Reemplazando (10) en (9), es posible obtener la probabilidad de error de símbolo media condicionada para un valor de umbral, así

$$\bar{P}_s = \frac{1}{q} \int_m^\infty P_{(s|\alpha)}(\alpha) f_\alpha(\alpha) d\alpha. \quad (11)$$

Considerando codificación de Gray, la probabilidad de error de bit media puede ser obtenida a partir de la probabilidad de error de símbolo media utilizando la siguiente aproximación

$$\bar{P}_b \approx \frac{\bar{P}_s}{\log_2 M}. \quad (12)$$

#### 1) Probabilidad de error de bit media para BPSK y QPSK

Para las modulaciones BPSK y QPSK, la probabilidad de error de símbolo condicionada es dada por [18]

$$P_{(s|\alpha)}(\alpha) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\alpha^2 \frac{E_b}{N_0}} \right), \quad (13)$$

donde  $\operatorname{erfc}(x)$  es la función de error complementaria.

La probabilidad de error de bit media del sistema oportunista puede ser obtenida reemplazando (13) en (11) y luego este resultado es usado en (12). La expresión resultante es

$$\bar{P}_b = \frac{1}{2q} \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_b}{v 2\sigma^2 + \bar{\gamma}_b}} \left[ \operatorname{erf} \left( m \sqrt{\frac{1}{2\sigma^2} + v \bar{\gamma}_b} \right) - 1 \right] + \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(m \sqrt{v \bar{\gamma}_b}), \quad (14)$$

donde  $v = \frac{1}{m^2 + 2\sigma^2}$  y  $\bar{\gamma}_b$  fue definido en (8).

#### 2) Probabilidad de error de bit media para M-QAM

Para la modulación M-QAM, la probabilidad de error de símbolo condicionada es dada por

$$P_{(s|\alpha)}(\alpha) = \frac{2(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3 \log_2 M}{2(M-1)} \alpha^2 \frac{E_b}{N_0}} \right). \quad (15)$$

De manera semejante, la probabilidad de error de bit media del sistema oportunista empleando la modulación M-QAM puede ser obtenida empleando (15) en (11) y este resultado en (12). Así, la expresión resultante es

$$\overline{P}_b \approx \frac{2(\sqrt{M}-1)}{(\sqrt{M} \log_2 M)q} \frac{\sqrt{\overline{\gamma}_b}}{\sqrt{\frac{1}{w2\sigma^2} + \overline{\gamma}_b}} \left[ \operatorname{erf} \left( m \sqrt{\frac{1}{2\sigma^2} + w\overline{\gamma}_b} \right) - 1 \right] + \frac{2(\sqrt{M}-1)}{(\sqrt{M} \log_2 M)} \operatorname{erfc}(m\sqrt{w\overline{\gamma}_b}), \quad (16)$$

donde  $w = \frac{3 \log_2 M}{2(M-1)(m^2+2\sigma^2)}$  y  $\overline{\gamma}_b$  fue definido en (8).

#### IV. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO EN UN CANAL CON INTERFERENCIA DE CO-CANAL

En esta sección, el desempeño del sistema oportunista es evaluado en presencia de desvanecimiento e interferencia de co-canal en términos de la probabilidad de error de bit media en función de la relación del  $E_b/N_0$  y para diferentes valores de relación señal-interferencia.

##### A. Relación Señal a Ruido más Interferencia

La relación señal a ruido más interferencia (SNIR) es una medida que define la potencia de la señal de interés dividido para la suma de las potencias de las señales interferentes más la potencia del ruido. En el análisis, es considerado que el usuario de interés y los interferentes transmiten con las mismas características.

Cuando el número de interferentes es grande, como en el caso de un sistema celular, la interferencia puede ser modelada como una variable aleatoria Gaussiana debido al teorema del límite central. Consecuentemente, el equivalente pasa bajos de la señal recibida puede ser escrito como

$$r(t) = \alpha_0(t)s_0(t)\beta + \sum_{i=1}^{N_I} \rho \alpha_i(t) s_i(t)\beta + n(t), \quad (17)$$

dónde  $N_I$  es el número de interferentes de co-canal,  $\alpha_0(t)$  y  $\alpha_i(t)$  representan las amplitudes de los desvanecimientos del usuario de interés y de los usuarios interferentes, respectivamente. A partir de este análisis podemos obtener el  $k$ -ésimo símbolo recibido el cual es dado por:

$$Z_k = S_0 + I_0 + R_0, \quad (18)$$

donde  $S_0$  es la muestra recibida de la señal del usuario de interés que es dada por

$$s_0 = \alpha_{0,k} \sqrt{2} A x_{0,k} \beta, \quad (19)$$

$I_0$  es la muestra de la interferencia de co-canal, dada por

$$I_0 = \sum_{i=1}^{N_I} \rho \alpha_{i,k} \sqrt{2} A x_{i,k} \beta. \quad (20)$$

Es posible mostrar que la interferencia de co-canal puede ser modelada como una variable aleatoria Gaussiana con media cero, pues  $\overline{x_{i,k}} = 0, \forall i, k$  y su varianza es dada por

$$\sigma_{I_0}^2 = 2q\rho^2 N_I A^2 \overline{\alpha_{i,k}^2 x_{i,k}^2}. \quad (21)$$

Finalmente, la muestra del ruido es una variable aleatoria Gaussiana con media cero y varianza dada por

$$\sigma_{R_0}^2 = \frac{N_0}{2T_s}. \quad (22)$$

De los resultados anteriores, la relación señal-interferencia es dada por

$$\frac{S}{I} = \frac{\overline{S_0^2}}{\sigma_{I_0}^2} = \frac{1}{\rho^2 N_I}. \quad (23)$$

Por otra parte, la SNIR puede ser escrita como

$$\gamma_b = \frac{s_0^2}{2(\sigma_{I_0}^2 + \sigma_{R_0}^2)} = \frac{\alpha_{0,k}^2 2A^2 x_{0,k}^2 \beta^2}{2\alpha_{0,k}^2 \rho^2 A^2 x_{i,k}^2 + \frac{N_0}{T_s}} \quad (24)$$

cuyo valor medio es dado por:

$$\overline{\gamma}_b = \left( 2 \frac{I}{S} + \frac{1}{\log_2 M \alpha_{0,k}^2 E_b} \frac{N_0}{T_s} \right)^{-1}. \quad (25)$$

##### B. Probabilidad de Error de Bit Media

Para el escenario en el cual existe presencia de interferencia de co-canal, la probabilidad de error de símbolo media puede ser obtenida utilizando las expresiones (14) o (16) en función del esquema de modulación. Sin embargo, en estas expresiones es necesario utilizar el  $\overline{\gamma}_b$  definido en (25).

#### V. RESULTADOS NUMÉRICOS

El desempeño del sistema es analizado en esta sección utilizando las expresiones obtenidas en varios escenarios relevantes. Con el fin de evaluar la exactitud las expresiones analíticas obtenidas, se ha empleado el método de simulación de Monte Carlo.

La Fig. 3 y la Fig. 4 muestran la probabilidad de error de bit media en función de la relación  $E_b/N_0$  para las modulaciones BPSK y QPSK (las modulaciones BPSK y QPSK tienen el mismo desempeño) y 16QAM, respectivamente. Cada figura presenta diferentes valores de umbrales  $m_2, m_3, m_4$  y  $m_5$ , específicamente  $m_\ell$  representa el umbral cuando  $\ell = 1/q$ , donde  $q$  es la probabilidad de transmisión. Adicionalmente, estas figuras presentan una comparación entre un sistema ordinario y un sistema oportunista. Los resultados muestran que la probabilidad de error de bit media del sistema oportunista es mejor que aquella del sistema ordinario. Observe que conforme el umbral de transmisión aumenta el desempeño mejora todavía más. Por ejemplo, en la Fig. 3, un sistema ordinario con  $E_b/N_0 = 12$  dB presenta una probabilidad de error de bit media aproximada de  $10^{-2}$ , mientras que el sistema oportunista con umbral  $m_2$  presenta una probabilidad de error de bit media aproximada de  $10^{-7}$ .

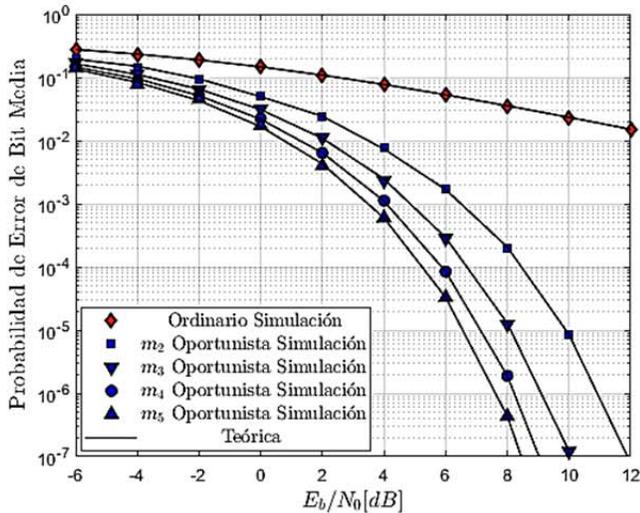


Fig. 3. Probabilidad de error de bit media en función de  $E_b/N_0$  para modulaciones BPSK-QPSK, considerando una comparación del sistema ordinario y oportunista para diferentes valores de umbral.

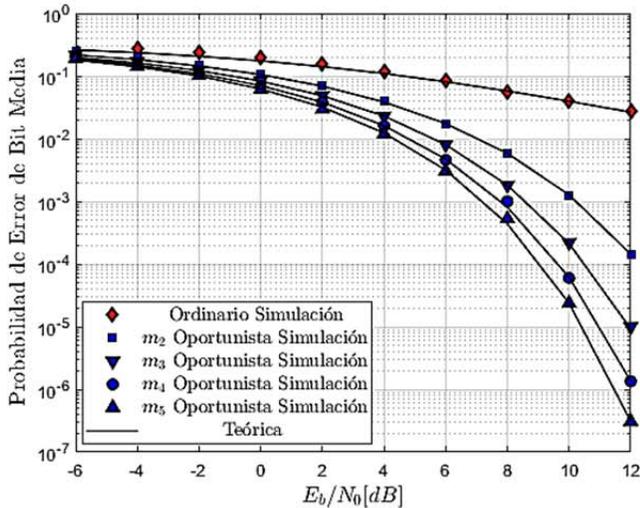


Fig. 4. Probabilidad de error de bit media en función de  $E_b/N_0$  para modulación 16-QAM, considerando una comparación del sistema ordinario y oportunista para diferentes valores de umbral.

La Fig. 5 y la Fig. 6 muestran la probabilidad de error de bit media en función de  $E_b/N_0$  en un canal con desvanecimiento y múltiples interferentes. Para este escenario se consideró un umbral  $m_2$ . Específicamente, la Fig. 5 considera las modulaciones BPSK y QPSK y la Fig. 6 considera la modulación 16-QAM. Adicionalmente, consideramos valores de relación señal-interferencia de SIR = 0, 12 e  $\infty$  dB para las modulaciones BPSK o QPSK y de SIR = 0, 18 e  $\infty$  dB para la modulación 16-QAM. Debido a que usamos múltiples interferentes podríamos considerar que este es el peor escenario de desempeño del sistema. Observe nuevamente que el sistema oportunista tiene mejor desempeño que el sistema ordinario. Esto ocurre porque cuando el usuario de interés transmite, es probable que los interferentes no lo hagan, lo que permite disminuir la varianza de la interferencia de co-canal.

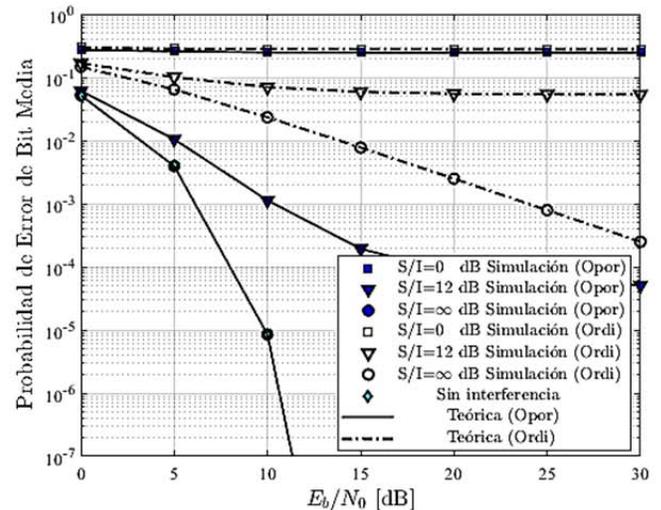


Fig. 5. Probabilidad de error de bit media en función del  $E_b/N_0$  para modulaciones BPSK-QPSK en presencia de múltiples interferentes de co-canal para los sistemas ordinario y oportunista con un umbral  $m_2$ .

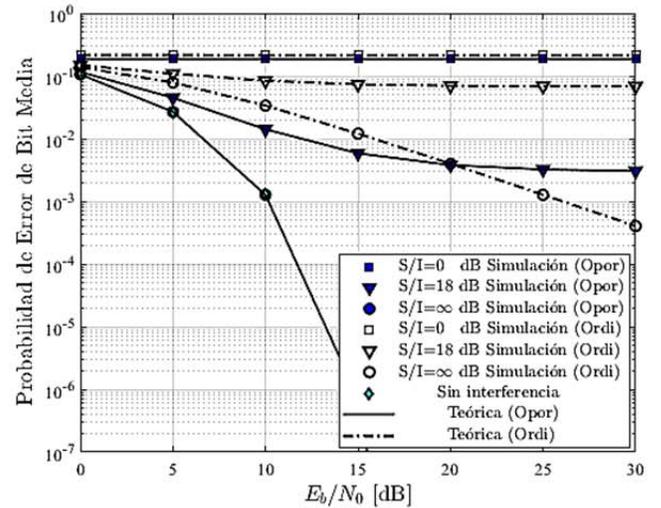


Fig. 6. Probabilidad de error de bit media en función del  $E_b/N_0$  para modulación 16-QAM en la presencia de múltiples interferentes de co-canal, para los sistema ordinario y oportunista con un umbral  $m_2$ .

## VI. CONCLUSIONES

En este artículo, se adaptó un mecanismo de transmisión oportunista para que opere en un canal con desvanecimiento plano y lento Rayleigh con múltiples interferentes de co-canal. Este mecanismo oportunista aprovecha el hecho de que el receptor estima el desvanecimiento e informa al transmisor a través de un enlace de realimentación. Así, la transmisión ocurre solamente en intervalos de tiempo en los cuales el desvanecimiento no es destructivo. Además, la presencia de múltiples interferentes de co-canal es considerada, así como también diferentes esquemas de modulación.

Se realizó un modelamiento matemático del sistema oportunista con el fin de evaluar el desempeño del sistema. Expresiones analíticas con forma cerrada para la probabilidad de error de bit media fueron obtenidas para los escenarios

estudiados. Todas las expresiones analíticas fueron validadas a través de las simulaciones de Monte Carlo. Los resultados analíticos y simulados tienen gran concordancia entre sí.

A partir de los resultados, se determinó que el sistema oportunista tiene mejor desempeño que el sistema ordinario. Así, el sistema oportunista presenta una baja probabilidad de error de bit media en la presencia de desvanecimiento e interferencia. Como caso particular, se observó que el desempeño del sistema oportunista empleando un umbral  $m_2$  es similar con el desempeño de un sistema ordinario en un escenario solamente con ruido. Por lo tanto, el método de transmisión oportunista elimina casi en su totalidad los efectos del desvanecimiento convirtiéndolo en un método simple y eficiente. Adicionalmente, es posible observar que conforme el umbral aumenta, el desempeño del sistema mejora aún más. Además, cabe mencionar que el sistema oportunista es menos sensible a interferencia que un sistema ordinario. Así, el sistema oportunista propuesto es una técnica alternativa interesante, eficaz y menos compleja para la implementación en sistemas inalámbricos.

#### REFERENCIAS

- [1] J. G. Torres and R. Bustamante, "Analysis of the effects of CQI Feedback for LTE Networks on ns-3," *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 13, No. 11, 2015.
- [2] M. Yacoub "Foundations of Mobile Radio Engineering", CRC-Press, 1993.
- [3] V. Tralli and R. Verdone, "Performance Characterization of Digital Transmission Systems with Co-Channel Interference", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 48, pp. 733745, 1999.
- [4] H. Carvajal, et al, "Mean Bit Error Rate Evaluation of MC-CDMA Cellular Systems Employing Multiuser-Maximum-Likelihood Detector", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 11, pp. 9838-9851, 2017.
- [5] C. D. Altamirano and C. de Almeida, "Evaluation of the Effects of Co-Channel Interference on the Bit Error Rate of Wireless Networks with Error Correcting Codes in Fading Channels", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 11, no. 3, pp. 892-895, 2013.
- [6] H. Roelofs, R. Srinivasan and W. van Etten. "Performance Estimation of M-ary PSK in Co-Channel Interference Using Fast Simulation", in *IEEE Proceedings - Communications*, Vol. 150, No. 5, 2003.
- [7] X. Tang, M. Alouini and A. Goldsmith "Effect of Channel Estimation Error on M-QAM BER Performance in Rayleigh Fading", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 47, pp. 1856-1864, 1999.
- [8] M. Stojanovic, et al "Analysis of the Impact of Channel Estimation Errors on the Performance of a Decision-Feedback Equalizer in Fading Multipath Channels," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 43, pp. 877-886, 1995.
- [9] G. Caire and S. Shamai, "On the Capacity of Some Channels with Channel State Information," in *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 45, pp. 2007-2019, 1999.
- [10] L. Marzetta and M. Hochwald, "Fast Transfer of Channel State Information in Wireless Systems", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 54, pp. 1268-1278, 2006.
- [11] T. Ericsson, "A Gaussian Channel with Slow Fading", *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. IT-16, pp. 353-356, 1970.
- [12] H. Xiao, et al., "An Optimal Transmission Policy for Opportunistic Spectrum Access in Fading Channels," in *International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP)*, 2011.
- [13] M. Derakhshani and T. Le-Ngoc, "Learning-Based Opportunistic Spectrum Access with Hopping Transmission Strategy," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2012.

- [14] D. Piazza and L. Milstein, "Analysis of multiuser diversity in time-varying channels", *IEEE Transactions Wireless Communications*, 2007.
- [15] D. Rajan and K. Josiam, "Multiuser diversity in wireless networks: A diversity-multiplexing perspective," in 41st Annual Conference on Information Sciences and Systems, 2007.
- [16] Rappaport, "Wireless Communications, Principles and Practice," Upper Saddle River, NJ. Prentice Hall, 1996.
- [17] Athanasios Papoulis (1991). Probability Random Variables and Stochastic Process, McGraw-Hill.
- [18] John G. Proakis (2001). Digital Communication, Mc Graw-Hill, fourth edition.



**Nathaly Orozco Garzón** recibió el título de Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones en la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Sangolquí, Ecuador, en 2011. Además, obtuvo el título de Máster y Doctora en Ingeniería Eléctrica en el Área de Telecomunicaciones y Telemática en la Universidad Estatal de Campinas (UNICAMP), Brasil, en 2014 y 2018, respectivamente. Actualmente es Profesora a Tiempo Completo en la Universidad de las Américas (UDLA), Quito, Ecuador. Sus intereses de investigación se centran principalmente en el campo de las comunicaciones digitales con énfasis específico en técnicas de acceso múltiple, canales con desvanecimiento, sistemas oportunistas y tecnologías 5G.



**Henry Carvajal Mora** nació en Quito, Ecuador. Recibió el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones en la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE), Sangolquí, Ecuador, en 2009, donde fue el mejor graduado de todas las Ingenierías. Recibió los títulos de Máster y Doctor en Ingeniería Eléctrica en el área de Telecomunicaciones y Telemática en la Universidad Estatal de Campinas (UNICAMP), Brasil, en 2014 y 2018, respectivamente. Actualmente es Profesor-Investigador en la Universidad de las Américas (UDLA), Quito, Ecuador. Sus intereses de investigación se centran en los canales con desvanecimiento, sistemas de combinación de diversidad, sistemas de acceso múltiple, detección multiusuario, sistemas MIMO y sistemas de comunicaciones inalámbricas 5G.



**Celso de Almeida** recibió el título de Ingeniero Eléctrico, Máster y Doctor en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Estatal de Campinas (UNICAMP), Brasil, en 1980, 1983 y 1990, respectivamente. Se unió a la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UNICAMP en 1990, donde actualmente es Profesor Titular. Trabajó como ingeniero eléctrico en la industria desde 1982 hasta 1990 dentro del área de comunicaciones ópticas. Sus intereses de investigación se encuentran en los campos de CDMA, detección multiusuario, arreglos de antenas, sistemas MIMO, comunicaciones inalámbricas y códigos de corrección de errores.