

# DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE SISTEMAS DE RADIO SOBRE FIBRA CON ENLACES DE 900MHZ CON MODULACIONES EN FASE Y EN CUADRATURA

Gabriel Darío Villareal Revelo<sup>1</sup>, Juan Rafael Orozco Arroyave<sup>1</sup>, Diana Patricia Tobón Vallejo<sup>1</sup>,  
Natalia Gaviria Gómez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Telecomunicaciones Aplicadas (GITA), Universidad de Antioquia, Calle 70 No. 52 – 21 Medellín, Colombia.

## RESUMEN

La comunidad científica y las empresas de telecomunicación han desarrollado métodos que permiten la optimización del ancho de banda disponible en los diferentes medios de comunicación. Dada la alta capacidad de transporte de información que ofrecen los enlaces de fibra óptica y la flexibilidad que aportan los enlaces inalámbricos, la tecnología de radio sobre fibra (RoF *Radio over Fiber*) ha mostrado ser una alternativa que promete ayudar a resolver el problema de la capacidad de transporte y el acceso a la red. El desempeño de los enlaces basados en la tecnología de RoF ha sido analizado ampliamente en la literatura; sin embargo, hace falta establecer cuáles son las condiciones óptimas de operación en términos de la tasa de error de símbolo (SER *Symbol Error Rate*) cuando son modificadas tanto la distancia de los enlaces de fibra como los tipos de modulación utilizados en la interface de radio del sistema. Se analiza el comportamiento de un sistema de RoF con portadoras OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) a 900Mhz cuando son modificadas las variables de distancia en fibra y tipo de modulación multinivel (en fase y en cuadratura). Es posible establecer que la modulación 16 QAM ofrece el mejor balance entre eficiencia espectral, rendimiento en términos de tasa de error de símbolos y distancia, mostrando tasas de error de símbolo (SER) de  $10^{-3}$  para configuraciones con enlaces ópticos de 60Km de distancia.

**Palabras clave:** Radio sobre fibra, modulación en fase, modulación en cuadratura, OFDM.

Recibido: 1 de abril de 2013.  
*Received: April 1<sup>st</sup>, 2013.*

Aceptado: 2 de Junio de 2013.  
*Accepted: June 2<sup>nd</sup>, 2013.*

## PERFORMANCE ANALYSIS AND DESCRIPTION OF RADIO OVER FIBER SYSTEMS WITH LINKS AT 900MHZ WITH IN-PHASE AND QUADRATURE MODULATIONS

### ABSTRACT

*The research community and telecommunications companies have developed new methods for bandwidth optimization. The high transport capacity of optic fiber links and the high flexibility of wireless networks have done the Radio over Fiber (RoF) technology be considered as a promising alternative for the solution of the increasing bandwidth and network access requirements. The performance of the RoF systems has been widely analyzed; however, it is also important to understand the behavior of the Symbol Error Rate (SER) when the distances and the modulation schemes are modified. The behavior of a RoF system with OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) carriers at 900 MHz is evaluated considering the variation of the distance in the optic fiber inks and the multilevel modulation (in phase and in quadrature) in the radio interfaces. It is possible to state that the 16 QAM modulation schema offers the best balance between spectral efficiency, performance in terms of the symbol error rate (SER) and distance. With this modulation schema it is possible to achieve distances of 60 Km with SER values of  $10^{-3}$ .*

**Keywords:** Radio over fiber, in-phase modulation, quadrature modulation, OFDM.

## 1. INTRODUCCIÓN

La masificación en los servicios de telecomunicación y multimedia exige la posibilidad de ofrecer movilidad, interactividad y conectividad permanente a los usuarios. De acuerdo con CISCO Systems, en el 2016 el tráfico global de datos móviles alcanzará los 10.8 Exabytes por mes, de los cuales 0.74 serán consumidos en América Latina [1]. Con el fin de poder atender la creciente demanda, ha sido necesario desarrollar tecnologías de transporte eficientes que permitan establecer conexiones de alta velocidad, manteniendo la movilidad y la confiabilidad que actualmente se ofrece a los usuarios.

La tecnología de radio sobre fibra (RoF) permite ofrecer conectividad de manera flexible y con grandes anchos de banda, manteniendo una alta disponibilidad de la red y permitiendo lograr altos niveles de servicio [2]. RoF es una tecnología que integra las ventajas de las redes de fibra óptica con las de las redes inalámbricas, permitiendo el acceso de alta velocidad con una relación beneficio/costo muy alta para los servicios de telecomunicación que se ofrecen en lugares apartados de las grandes urbes o con densidad poblacional baja.

Con el fin de lograr configuraciones de sistemas de RoF cada vez más eficientes, se busca aumentar la distancia en el transporte sobre fibra óptica sin tener que utilizar etapas de amplificación. Una de las estrategias que se adoptan para lograr esto es aumentar la potencia de transmisión; sin embargo, cuando esto se hace aparecen problemas de dispersión cromática (CD) y dispersión por el modo de polarización (PMD) [3]. Estos problemas pueden ser mitigados usando multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM), la cual ha sido implementada en los sistemas de RoF mostrando una alta eficiencia espectral y resistencia a la dispersión cromática y de tipo PMD [7-9]. La modulación OFDM ha sido ampliamente utilizada en sistemas de acceso inalámbrico como WiMax [4, 5], 802.11g [6] y DVB (*Digital Video Broadcasting*) [7] y se ha demostrado que ésta es una tecnología eficiente y robusta ante el desvanecimiento selectivo en frecuencia y a la interferencia de banda estrecha [10].

El desempeño de los sistemas RoF basados en OFDM ha sido analizado en diversos trabajos

reportados en la literatura. En [11] los autores implementan un sistema WiMax con arquitectura RoF a 3.5 GHz, utilizan 128 subportadoras, cada una modulada con 64 QAM (6 bits por símbolo), un ancho de banda de 20MHz y una tasa de transmisión de 120 Mbps. A nivel óptico la señal es modulada sobre un láser con una longitud de onda de 1550 nm utilizando un modulador Mach-Zehnder (MZM). Utilizan amplificadores tipo EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) y diferentes tipos de fibra: SMF (Single Mode Fiber), DCF (Dispersion Compensating Fiber) y CFBG (Chirped Fiber BRAGG Gratings). De acuerdo con los resultados presentados por los autores, con esta configuración se logran transmisiones con alcances de hasta 792 Km.

Por otra parte, en [12] se estudia la factibilidad de usar modulación externa y un foto-detector sin amplificación en un sistema de RoF con modulación OFDM a 5 GHz con 20 MHz de ancho de banda sobre un esquema de 64 QAM. De acuerdo con los resultados presentados en dicho trabajo, es posible mover la etapa de amplificación, de la etapa eléctrica a la etapa óptica.

Adicionalmente, en [13] los autores demuestran que es posible implementar en una misma red, configuraciones de sistemas de RoF y PON (Passive Optical Networks). De acuerdo con los resultados, en enlaces de 25 Km, usando fibra mono-modo, las pérdidas de potencia están por debajo de 0.5 dB, indicando que es posible hacer converger estas dos tecnologías de acceso en una misma red.

En [14] los autores presentan un análisis de desempeño de un sistema de RoF en términos de la tasa de pérdida de paquetes (PER) y la magnitud del vector de error respecto a las potencias de entrada. Las bandas de frecuencia consideradas en el trabajo van desde los 900 MHz hasta los 5.8 GHz. De acuerdo con los resultados reportados, con potencias de  $-12.5$  dB a la entrada de una red WLAN, el desempeño del sistema permite cumplir con los requerimientos del estándar WLAN (802.11a), con tasas de error de paquetes de 0.1. Sin embargo, esta configuración requiere una sincronización muy precisa entre la trama de bits enviada y la recibida. Dentro del mismo trabajo los autores encontraron que la potencia de radio frecuencia en diferentes bandas es muy similar,

permitiendo el uso de bandas más amplias para aplicaciones de RoF.

También considerando bandas de frecuencia de servicios celulares, en [15] los autores analizan la viabilidad de utilizar un filtro pasabanda usando rejillas de Bragg en el proceso de demultiplexación de señales ópticas dentro de un sistema de RoF cuyo acceso inalámbrico es usando tecnología CDMA con frecuencias de 2.4 GHz y 900 MHz. De acuerdo con los resultados reportados, el filtro propuesto logra filtrar señales con una precisión de 50 MHz sin introducir distorsiones significativas, permitiendo la demultiplexación óptica de señales de radio multimedia muy cercanas en el espectro.

A pesar que la tecnología de RoF ha tenido un desarrollo acelerado en los últimos años, la mayoría de los trabajos que se presentan en la literatura sitúan la frecuencia de portadora por encima de los 3GHz y los que implementan este tipo de sistemas con portadoras en frecuencias más bajas (entre 900 MHz y 2.4 GHz) no analizan el compromiso existente entre el tipo de modulación implementado y la distancia alcanzada manteniendo tasas aceptables de error de símbolo.

Con el fin de analizar la posibilidad de hacer despliegues de sistemas de RoF sobre la infraestructura de redes móviles celulares existente, en este artículo se presenta un análisis de desempeño de un sistema de RoF en términos de la influencia que tiene la distancia en fibra en la tasa de error de símbolo.

El resto del artículo está organizado así: en la sección 2 se describen las componentes principales de un sistema de RoF y se presenta la metodología de análisis estadístico mediante la cual son analizados los resultados de las simulaciones llevadas a cabo. La sección 3 ilustra las simulaciones realizadas, cuyos resultados son presentados y analizados en la sección 4, y la sección 5 incluye las conclusiones que se derivan del trabajo realizado.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Sistemas de RoF

La característica principal de un sistema de RoF es la presencia de enlaces ópticos que transmiten señales de RF moduladas. El esquema de transmisión determina la complejidad y el costo de

la implementación. En los diseños de sistemas de RoF para el canal ascendente y el descendente se debe asegurar la reducción de costos, y es necesario emplear la configuración adecuada de los componentes de RoF que dependen directamente de la frecuencia de la portadora, la modulación, el ancho de banda, el medio, entre otras variables. Las frecuencias típicas de portadora de los sistemas de comunicación inalámbrica clásicamente implementados como las redes de celular, están alrededor de los 3 GHz, sin embargo, con el fin de aumentar la eficiencia espectral y de disminuir las pérdidas por congestión del espectro, los sistemas típicos de RoF utilizan portadoras de más alta frecuencia, alrededor de los 20 GHz, donde se hace esencial el uso de moduladores externos. A pesar de que las aplicaciones típicas de sistemas de RoF se dan a frecuencias alrededor de 20 GHz, el estudio de aplicaciones de este tipo en frecuencias bajas, por ejemplo 900 MHz, es relevante debido a su impacto en el crecimiento en la cobertura de las redes celulares existentes.

En los sistemas de RoF la información es mapeada usando modulaciones multinivel en fase ( $m$ -PSK) ó en cuadratura ( $m$ -QAM). Posteriormente, la información es modulada para luego ser entregada al láser. En este trabajo se ha implementado una etapa de modulación con portadoras OFDM, dándole al sistema características de robustez ante la distorsión cromática y de tipo PMD. La frecuencia de trabajo elegida para las simulaciones realizadas ha sido los 900 MHz debido a su posible impacto en la ampliación de cobertura de las redes de celular que actualmente operan a esta frecuencia. La Fig.1, muestra un esquema de la forma como se hace el despliegue de un sistema de RoF sobre una red celular existente.

En la implementación mostrada en la Fig.1, se ilustra cómo la información que fluye entre cada una de las radio bases (BS) es transportada a través de enlaces de fibra óptica, los cuales son interconectados en un sitio llamado estación de control (CS), el cual está encargado de efectuar los procesos de modulación/demodulación, codificación/decodificación, enrutamiento y multiplexación/demultiplexación. Las BS se encargan de la conversión electro-óptica.

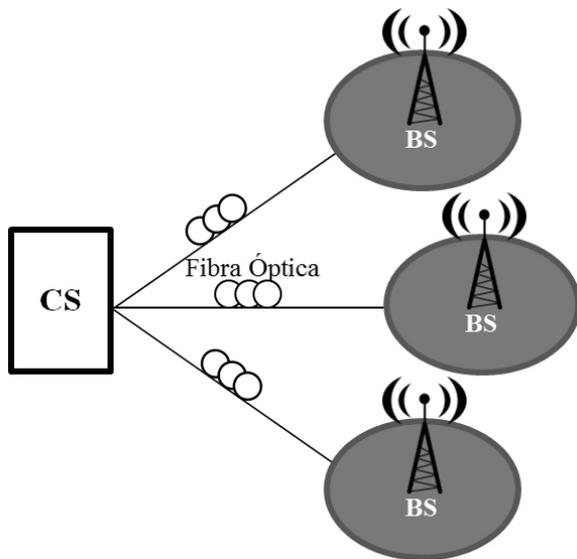


Fig.1. Sistema de RoF operando en una red celular. BS: estación base o radio base. CS: estación de control.

## 2.2 Metodología

La metodología desarrollada se basa en un diseño experimental que busca encontrar la mejor configuración de la red de fibra óptica en términos de distancia y tipo de modulación. Los resultados que se obtienen en las simulaciones realizadas son analizados siguiendo esta metodología que incluye cinco componentes: la unidad experimental, los factores, los niveles, los tratamientos y variable respuesta. Cada una de estas componentes será definida a continuación:

- *Unidad experimental*

En la Fig.2, se ilustra la unidad experimental que está conformada por las componentes básicas de una red de fibra óptica (transmisor, receptor y amplificador) en la cual se hacen las configuraciones y mediciones dentro de las simulaciones realizadas.

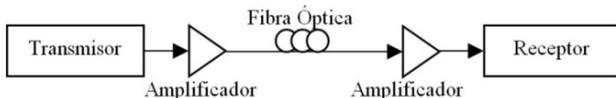


Fig.2. Unidad experimental.

- *Factores*

Para el análisis que se quiere desarrollar se tienen dos factores: distancia y tipo de modulación.

El montaje realizado busca determinar si los factores y su interacción influyen sobre la variable respuesta y con qué valor o nivel de ellos se desempeña mejor la red propuesta.

- *Niveles*

En el diseño experimental planteado se tienen dos factores y para cada uno de ellos se consideran diferentes niveles. Para el factor *distancia* se analizan 20 niveles desde 5000 hasta 100000 metros, y para el factor *tipo de modulación* se analizan 4 niveles 4 QAM, 4 PSK, 16 PSK y 16 QAM.

- *Tratamientos*

Son la combinación de los niveles de todos los factores. Para este caso se tienen  $20 \times 4 = 80$  tratamientos y por cada tratamiento se tienen 50 repeticiones, para un total de 4000 datos de tasa de error de símbolo. Las repeticiones son importantes en el diseño experimental porque permiten determinar si la variabilidad de los datos se debe a errores introducidos por la dinámica del fenómeno o a los factores considerados en el diseño experimental.

- *Variables respuesta*

La variable respuesta de interés es la tasa de error de símbolo. El objetivo es encontrar la mejor combinación entre los factores distancia y tipo de modulación que tenga un mejor desempeño en cuanto a esta variable respuesta. En la Fig.3 se muestra un diagrama que ilustra el diseño experimental realizado.

### 2.2.1 Análisis a desarrollar (ANOVA)

Los tratamientos serán comparados a través de un análisis de varianza usando un diseño factorial con dos factores, distancia con 20 niveles y tipo de modulación con 4 niveles. El diseño factorial permite evaluar el efecto individual y conjunto de dos o más factores sobre una variable respuesta y es usado con el supuesto de que los factores influyen en la variable respuesta lo cual es validado con el análisis de varianzas (ANOVA). Con el resultado del ANOVA se hacen estimaciones y pruebas de hipótesis.

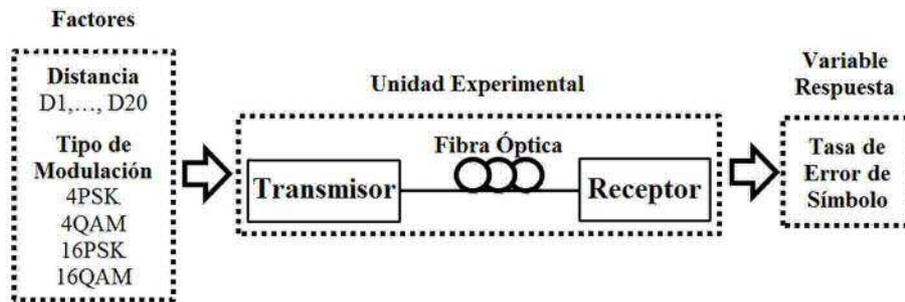


Fig.3. Diseño experimental.

En el ANOVA factorial por cada factor y combinación de ellos existe una hipótesis nula. Para un factor, la hipótesis nula afirma que las medias de los niveles del factor son iguales y para la combinación de factores afirma que tal efecto de interacción es nulo. Así, cada factor y efecto tiene una hipótesis y un nivel de significancia que determinará si tal hipótesis es aceptada o rechazada. La hipótesis nula se rechaza si el nivel de significación (valor P) es menor a 0.05. De esta manera, se definirá si los factores y los niveles escogidos son pertinentes para la variable respuesta al igual que se podrá determinar cuál es la mejor combinación de ellos.

### 3. EXPERIMENTOS

La secuencia aleatoria de bits es mapeada usando tres esquemas de modulación multinivel diferentes: 16 QAM, 4 PSK y 16 PSK, luego la información es modulada sobre cada portadora a nivel eléctrico (RF-OFDM), posteriormente la respectiva señal multi-portadora se modula directamente a través de un láser y se envía a través de una fibra óptica mono-modo con dispersión típica de 20 ps/nm·Km. En el receptor, la señal es detectada y descompuesta en sus diferentes sub-portadoras, para luego restaurar la secuencia de datos enviada de acuerdo con el formato de modulación multinivel elegido.

El sistema descrito ha sido simulado usando el software *VPI Photonic*, el cual es ampliamente utilizado por diferentes autores para la simulación de redes y sistemas basados en fibra óptica [16,17].

En la Fig.4a se muestra el diagrama esquemático de la etapa de transmisión del sistema simulado en el *VPI Photonic*. El proceso se describe a continuación: primero se genera una secuencia de bits aleatorios a una tasa de 256 Mbps, luego éstos son modulados en el módulo OFDM empleando 256 sub-portadoras sobre las cuales es distribuida la información. Se incluye un prefijo cíclico de 10% por símbolo OFDM y se emplea alguno de los tipos de codificación antes señalados: (16 QAM, 4 PSK ó 16 PSK). Tercero, se conforman los pulsos de las señales reales e imaginarias. A continuación se realiza la conversión al dominio de la radiofrecuencia, el cual se logra mediante una señal sinusoidal con frecuencia de 900MHz y un desfase de 90°. Por último se emplea el módulo Logic Add Channel del software VPI-Photonic, el cual permite asignar un canal lógico a cada secuencia de datos. Esto permite efectuar los cálculos de manera independiente para cada canal lógico.

La Fig.4b muestra la etapa de recepción del sistema e ilustra los puntos donde se estiman las medidas de desempeño del sistema propuesto. Esta etapa se encarga de recuperar los bits de datos que se encuentran a una frecuencia de 900 MHz.

Se forman los pulsos y se decodifica la señal OFDM, se captura la constelación correspondiente al enlace establecido (de acuerdo con el formato de modulación elegido) y por último se emplea un medidor de SER para estimar el error de símbolo en la señal.

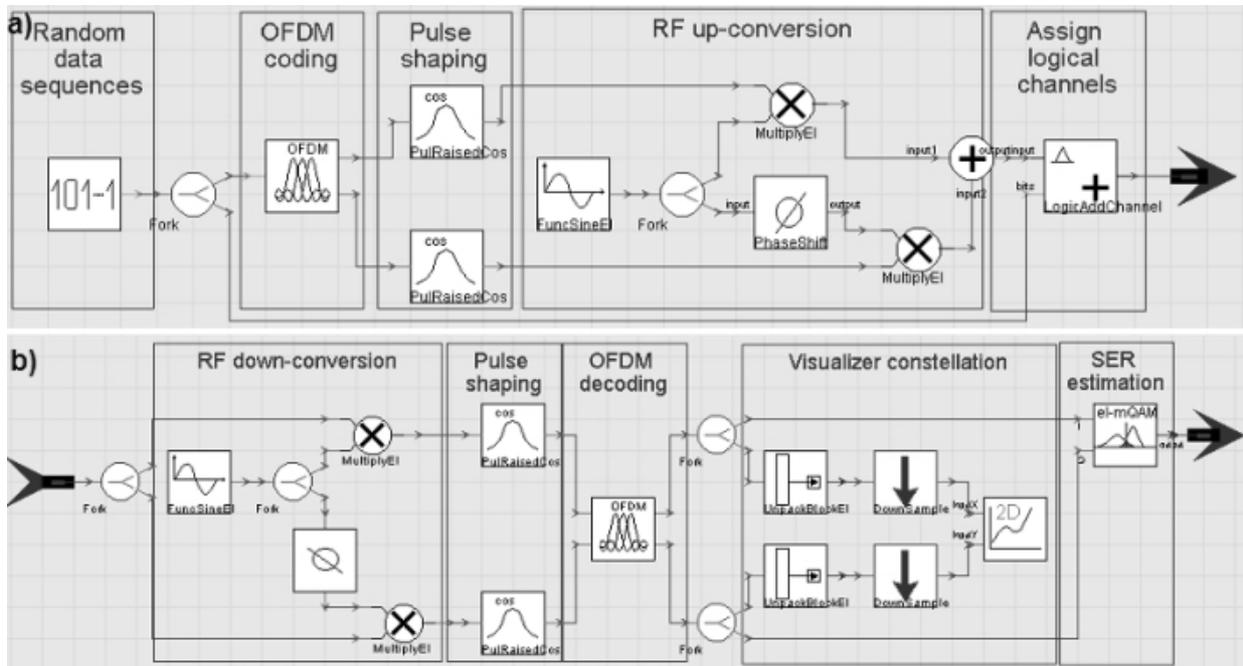


Fig.4. Diagrama esquemático de las etapas de transmisión y recepción del sistema simulado. Figura tomada del software VPI Photonic (licenciado en la Universidad de Antioquia, Medellín).

Dado que en los sistemas de RoF la función de densidad de probabilidad (FDP) de los datos no sigue una distribución Gaussiana [3], la estimación del SER en este caso debe realizarse mediante la estimación de la FDP correspondiente para cada símbolo.

Los procesos de conversión entre los dominios eléctrico y óptico son ilustrados en la Fig.5. La conversión electro-óptica (E/O) se realiza mediante modulación externa usando un modulador Mach-Zehnder sobre un láser de 1550 nm con una potencia de 3 mW y un ancho de línea de 6 MHz.

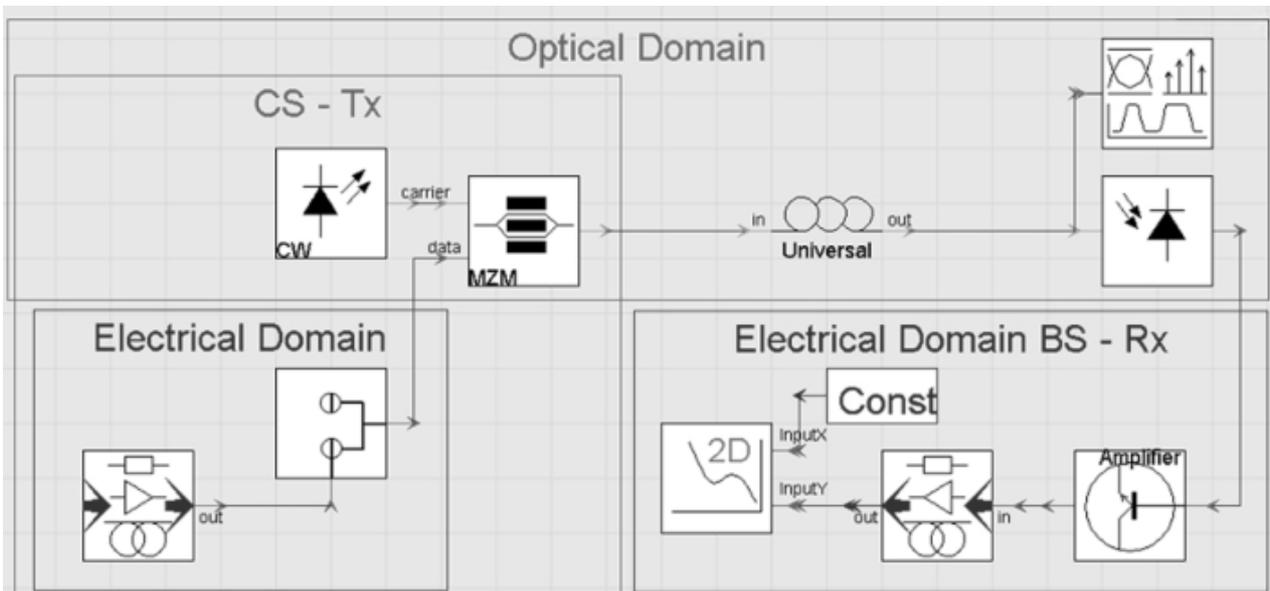


Fig.5. Procesos de conversión entre los dominios eléctrico y óptico para la transmisión y recepción de información. Figura tomada del software VPI Photonic (licenciado en la Universidad de Antioquia, Medellín).

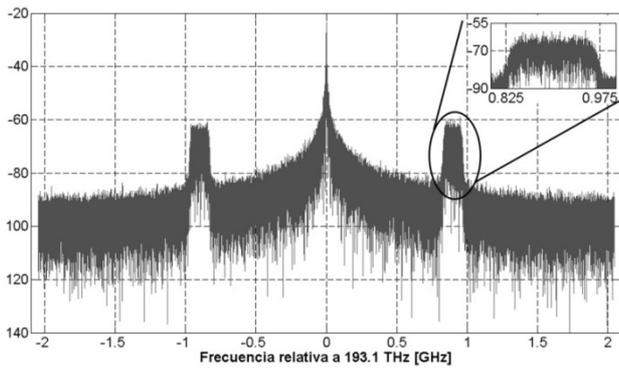


Fig. 6a. Espectro óptico usando 4 PSK

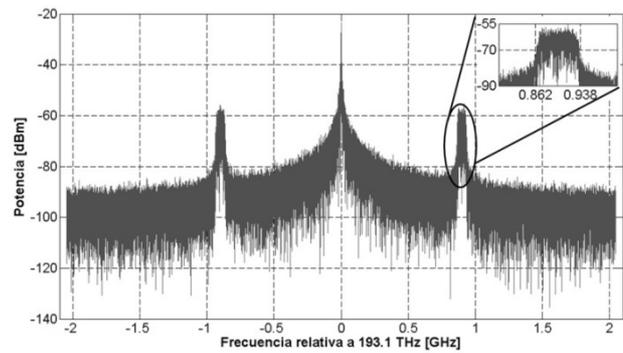


Fig. 7. Espectro óptico usando 16 PSK

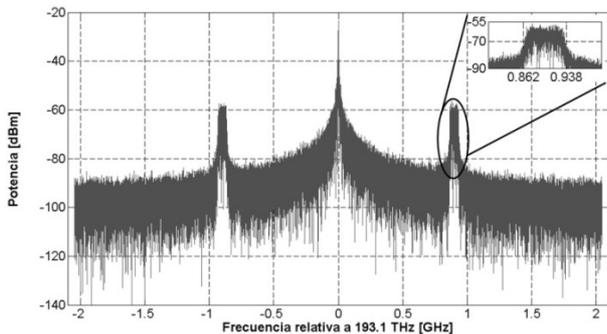


Fig. 6b. Espectro óptico usando 16 QAM

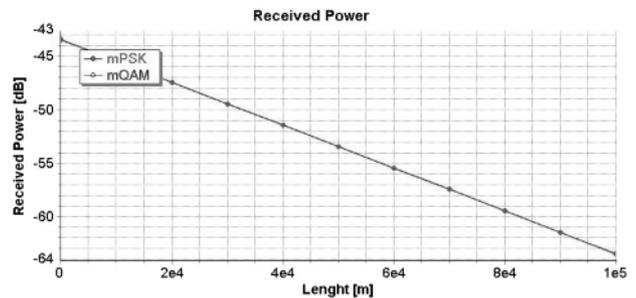


Fig. 8. Comportamiento de la potencia de recepción para cada uno de los esquemas de modulación adoptados.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Espectro óptico

Las Fig.6a y 6b muestran los espectros ópticos logrados en la etapa de transmisión del sistema cuando se aplican formatos de modulación en cuadratura, 4 QAM y 16 QAM, respectivamente. En la Fig.6a se muestra que el ancho de banda requerido para la transmisión de una señal OFDM mapeada con 4 PSK es de aproximadamente 153.25 MHz. Para el caso de la Fig.6b, cuando el esquema de modulación es 16 QAM, el ancho de banda requerido para la transmisión de señales OFDM es de 78.23 MHz, mostrando una eficiencia espectral de casi el doble respecto a la exhibida usando 4 PSK. Respecto al ancho de banda requerido para la transmisión de señales en formato de 16 PSK, la Fig.7 muestra que se requiere alrededor de 78.18 MHz para efectuar dicha transmisión.

### 4.2 Potencia de recepción

La potencia de la señal recibida también es analizada. La Fig. 8 muestra cómo, independiente del esquema de modulación elegido, el comportamiento de la potencia de recepción es el mismo a medida que se aumenta la distancia en fibra.

Este es un importante resultado que permite asegurar que los cambios observados en la tasa de error de símbolos serán debidos únicamente al cambio en los esquemas de modulación y no debidos a la potencia recibida en cada enlace.

Las pérdidas de potencia exhibidas corresponden a un decremento lineal de 0.2 dB/Km, lo cual corresponde con las características de las pérdidas en la fibra óptica mono modo utilizada.

### 4.3 Tasa de error de símbolo

La medida de SER indica la fiabilidad del enlace de RoF. Para las señales OFDM transmitidas se considera que un SER de  $10^{-3}$  es adecuado. A pesar de ser tan alto, se establece un umbral de  $10^{-3}$  debido a que una vez es realizado el proceso de modulación (óptico y eléctrico), los sistemas de comunicación deben aplicar técnicas de FEC (*Forward Error Correction*), los cuales se encargan de mejorar o adaptar el formato de los datos a las condiciones del enlace para reducir las tasas de error a valores del orden de  $10^{-12}$ [18, 19].

Como se muestra en la sección 4.2, el comportamiento en la potencia de recepción no depende del esquema de modulación adoptado.

Con el fin de analizar el comportamiento de la tasa de error de símbolos y de los diferentes esquemas de modulación implementados con la distancia en fibra, se ha realizado un detallado análisis estadístico de los datos siguiendo la metodología expuesta en la sección 2.2. Los datos son comparados usando un análisis de varianza (ANOVA) para un diseño factorial con dos factores. El diseño factorial se emplea para considerar la influencia que cada uno de los factores tiene en la variable respuesta del sistema. Las pruebas estadísticas son realizadas sobre los resultados obtenidos en las mediciones de SER para valores de distancia que van desde  $D1 = 5000\text{m}$  hasta  $D20 = 100000\text{m}$  en pasos de  $5000\text{m}$ .

Para poder realizar el ANOVA se deben cumplir dos supuestos: independencia de las observaciones y distribución normal del error.

*Independencia de las observaciones:* este supuesto se cumple puesto que los tratamientos y sus repeticiones se realizaron de manera aleatoria.

*Distribución normal del error:* este supuesto se cumple si el comportamiento de los datos sigue una distribución normal, lo cual es validado mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnoff. Si el valor de la significación (Sig.) en la Tabla 1 es mayor a 0.05, entonces los tratamientos cumplen con este supuesto. Es importante anotar que para lograr cumplir con el supuesto de distribución normal del error, fue necesario hacer una transformación exponencial de los datos. La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos en este análisis para cuatro esquemas de modulación: 4PSK, 16PSK, 4QAM y 16QAM considerando valores de distancia desde  $D1 = 5000\text{m}$  hasta  $D20 = 100000\text{m}$  en pasos de  $5000\text{m}$ .

Una vez analizados los supuestos, se procede a realizar el ANOVA. Este análisis usa la distribución F para el contraste de hipótesis. Existe una hipótesis nula por cada factor y por cada posible combinación de factores. La hipótesis nula de un factor afirma que las medias de los niveles del factor son iguales, mientras que la hipótesis nula de un efecto de interacción (en este caso la única interacción es "distancia - tipo de modulación") afirma que tal efecto es nulo. Para cada efecto existe una hipótesis y para cada hipótesis un nivel de significancia que determinará si dicha hipótesis

es rechazada o aceptada. La hipótesis nula se rechaza si la significación es menor a 0.05. Los resultados del ANOVA realizado se muestran en la Tabla 2, los cuales son presentados como en [20].

Tabla 1. Resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnoff

| Test de Kolmogorov-Smirnoff |       |             |       |
|-----------------------------|-------|-------------|-------|
| Dist.-Mod.                  | Sig.  | Dist. -Mod. | Sig.  |
| D1 – 16QAM                  | 0.107 | D12 – 4QAM  | 0.842 |
| D1 – 16PSK                  | 0.749 | D12 – 16QAM | 0.900 |
| D2 – 16QAM                  | 0.100 | D12 – 4PSK  | 0.952 |
| D2 – 16PSK                  | 0.820 | D12 – 16PSK | 0.401 |
| D3 – 16QAM                  | 0.077 | D13 – 4QAM  | 0.843 |
| D3 – 16PSK                  | 0.624 | D13 – 16QAM | 0.755 |
| D4 – 16QAM                  | 0.118 | D13 – 4PSK  | 0.942 |
| D4 – 16PSK                  | 0.639 | D13 – 16PSK | 0.333 |
| D5 – 4QAM                   | 0.816 | D14 – 4QAM  | 0.864 |
| D5 – 16QAM                  | 0.113 | D14 – 16QAM | 0.543 |
| D5 – 4PSK                   | 0.891 | D14 – 4PSK  | 0.922 |
| D5 – 16PSK                  | 0.703 | D14 – 16PSK | 0.302 |
| D6 – 4QAM                   | 0.788 | D15 – 4QAM  | 0.888 |
| D6 – 16QAM                  | 0.096 | D15 – 16QAM | 0.819 |
| D6 – 4PSK                   | 0.935 | D15 – 4PSK  | 0.876 |
| D6 – 16PSK                  | 0.575 | D15 – 16PSK | 0.295 |
| D7 – 4QAM                   | 0.811 | D16 – 4QAM  | 0.910 |
| D7 – 16QAM                  | 0.083 | D16 – 16QAM | 0.957 |
| D7 – 4PSK                   | 0.903 | D16 – 4PSK  | 0.837 |
| D7 – 16PSK                  | 0.591 | D16 – 16PSK | 0.264 |
| D8 – 4QAM                   | 0.790 | D17 – 4QAM  | 0.917 |
| D8 – 16QAM                  | 0.158 | D17 – 16QAM | 0.977 |
| D8 – 4PSK                   | 0.942 | D17 – 4PSK  | 0.790 |
| D8 – 16PSK                  | 0.493 | D17 – 16PSK | 0.221 |
| D9 – 4QAM                   | 0.814 | D18 – 4QAM  | 0.817 |
| D9 – 16QAM                  | 0.508 | D18 – 16QAM | 0.966 |
| D9 – 4PSK                   | 0.938 | D18 – 4PSK  | 0.782 |
| D9 – 16PSK                  | 0.453 | D18 – 16PSK | 0.283 |
| D10 – 4QAM                  | 0.786 | D19 – 4QAM  | 0.765 |
| D10 – 16QAM                 | 0.401 | D19 – 16QAM | 0.943 |
| D10 – 4PSK                  | 0.963 | D19 – 4PSK  | 0.755 |
| D10 – 16PSK                 | 0.517 | D19 – 16PSK | 0.383 |
| D11 – 4QAM                  | 0.798 | D20 – 4QAM  | 0.866 |
| D11 – 16QAM                 | 0.454 | D20 – 16QAM | 0.970 |
| D11 – 4PSK                  | 0.957 | D20 – 4PSK  | 0.722 |
| D11 – 16PSK                 | 0.407 | D20 – 16PSK | 0.410 |

| Pruebas de los efectos inter-sujetos              |                            |      |                  |          |               |
|---|----------------------------|------|------------------|----------|---------------|
| Variable dependiente: salida                      |                            |      |                  |          |               |
| Fuente  | Suma de cuadrados tipo III | gl   | Media cuadrática | F        | Significación |
| Modelo corregido                                  | 37720432.535(a)            | 71   | 531273.7         | 2264.818 | 0.000         |
| Intersección                                      | 14809089                   | 1    | 14809089         | 63131.09 | 0.000         |
| Distancia   | 21466853                   | 19   | 1129834          | 4816.48  | 0.000         |
| Mapeo   | 4423283                    | 3    | 1474428          | 6285.48  | 0.000         |
| Distancia * Mapeo                                 | 13829751                   | 49   | 282239.8         | 1203.187 | 0.000         |
| Error   | 827586.9                   | 3528 | 234.577          |          |               |
| Total   | 49686239                   | 3600 |                  |          |               |
| Total corregida                                   | 38548019                   | 3599 |                  |          |               |
| a R cuadrado = .979 (R cuadrado corregida = .978) |                            |      |                  |          |               |

Tabla 2. Resultados del ANOVA realizado

El resultado de la Tabla 2 se analiza para cada efecto de la siguiente manera:

- Para el factor distancia, la hipótesis nula indica que los promedios poblacionales de la tasa de error de símbolo, para cada distancia ( $D_1 = 5000$  m,  $D_2 = 10000$  m, ...,  $D_{20} = 100000$  m), son iguales, es decir:

$$H_0 \rightarrow \overline{SER}_{D_1} = \overline{SER}_{D_2} = \dots = \overline{SER}_{D_{20}}$$

$H_0$  indica que la distancia no influye en la tasa de error de símbolo. Según el resultado del ANOVA, el valor de la significancia es menor que 0.05, es decir se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que la distancia sí afecta la tasa de error de símbolo.

- Para el factor tipo de modulación, la hipótesis nula indica que los promedios poblacionales de la tasa de error de símbolo, para cada tipo de modulación (16 QAM, 4 PSK, 16 PSK), son iguales, es decir:

$$H_0 \rightarrow \overline{SER}_{16QAM} = \overline{SER}_{4PSK} = \overline{SER}_{16PSK}$$

$H_0$  indica que el tipo de modulación no influye en la tasa de error de símbolo. Según el resultado del ANOVA, el valor de la significancia es menor que 0.05, lo que significa que se rechaza la hipótesis

nula, concluyendo que el tipo de modulación sí afecta el la tasa de error de símbolo.

- Para la interacción entre los factores distancia y tipo de modulación, la hipótesis nula afirma que el efecto de interacción entre los dos factores sobre la tasa de error de símbolo es cero, es decir:

$$H_0 \rightarrow SER(\text{distancia} * \text{tipo de modulación}) = 0$$

En el ANOVA se observa que el valor de la significancia es menor que 0.05, lo que significa que se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que la interacción de los factores sí afecta la tasa de error de símbolo. La Fig.9 muestra el comportamiento del SER para cada esquema de modulación mientras la distancia aumenta.

Tomando como referencia valores de SER de  $10^{-3}$ , en la Fig.9 se muestra que para un mapeo con 16 QAM es posible alcanzar una distancia de 60.0 Km. Al emplear un mapeo de 4 PSK se alcanzan distancias de 68.3 Km, mientras que para 16 PSK se alcanzan 50.0 Km. Con el fin de dar una imagen visual acerca del impacto que tiene la distancia sobre la probabilidad de error de símbolo, a continuación se presentan las gráficas de constelación obtenidas para cada tipo de modulación en valores de distancia fijados en 30Km y 60Km.

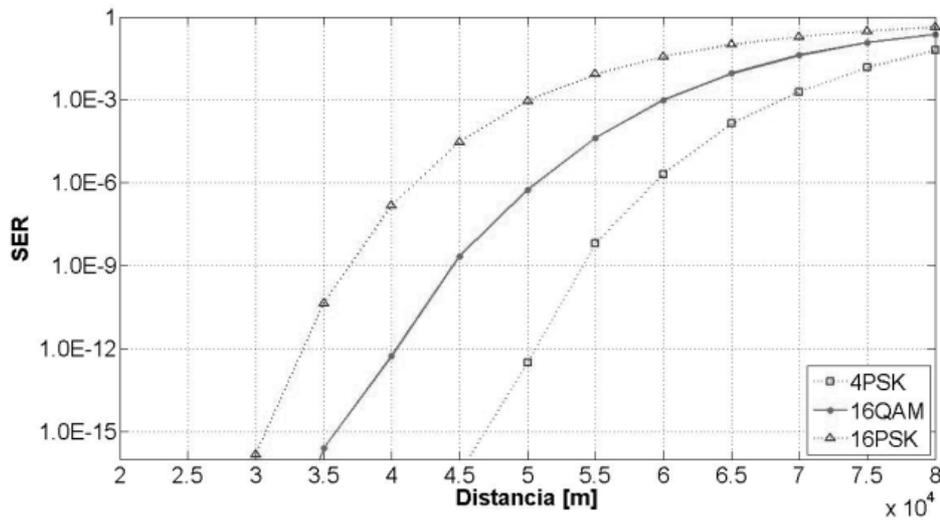


Fig. 9. Comportamiento del SER para cada uno de los esquemas de modulación, cuando la distancia aumenta. Figura tomada del software VPI Photonic (licenciado en la Universidad de Antioquia, Medellín).

Las Fig.10a y 10b muestran las constelaciones resultantes para las modulaciones en cuadratura, tomadas a 30 Km y 60 Km, respectivamente.

Para el caso de las modulaciones en fase, las Fig.11a y 11b muestran los resultados obtenidos en los diagramas de constelación. Para ambas modulaciones en cuadratura, 4 QAM y 16 QAM, visualmente es posible diferenciar cada uno de los símbolos en la constelación, tanto a 30 Km como a 60 Km; sin embargo, para las modulaciones en fase, 4 PSK y 16 PSK, el diagrama de constelación indica que la detección de los símbolos se hace más complicada, y por tanto con mayor probabilidad de error, para el caso de 16 PSK.

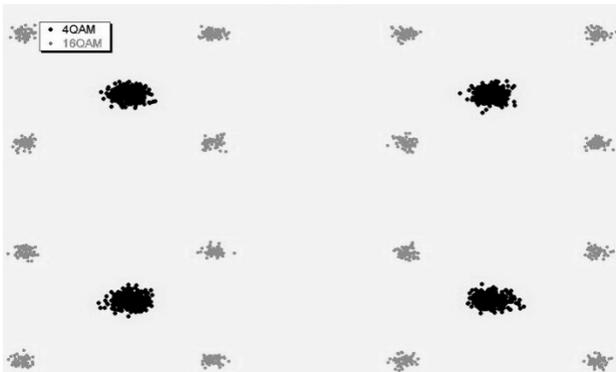


Fig. 10a. Constelación para mQAM a 30 Km. (4 QAM: azul y 16 QAM: rojo). Figura tomada del software VPI Photonic (licenciado en la Universidad de Antioquia, Medellín).

Este resultado soporta, de manera gráfica, el hecho de que la modulación 16 QAM es más eficiente que la modulación 16 PSK, pues a pesar de que ambas presentan eficiencia espectral similar, la probabilidad de error de símbolo es mayor cuando se usa 16 PSK.

### 5. CONCLUSIÓN

Se presenta una configuración de un sistema de RoF que puede ser utilizada en sistemas celulares con portadoras de radio a 900 MHz. El desempeño del sistema ha sido evaluado en términos de la distancia alcanzada antes de utilizar etapas de regeneración de señal, manteniendo niveles de  $10^{-3}$  errores por símbolo.

De acuerdo con las pruebas realizadas, al utilizar una fibra monomodo con dispersión típica de 20 ps/nm·Km, el ancho de banda requerido para la transmisión es de aproximadamente 153 MHz cuando se aplican modulaciones de tipo 4 PSK ó 4 QAM. Cuando se aplican mapeos de tipo 16 QAM ó 16 PSK, el ancho de banda requerido es de aproximadamente 78 MHz. La potencia de transmisión es igual para los escenarios planteados, dependiendo únicamente de las pérdidas ocasionadas por la estructura física de la fibra óptica.

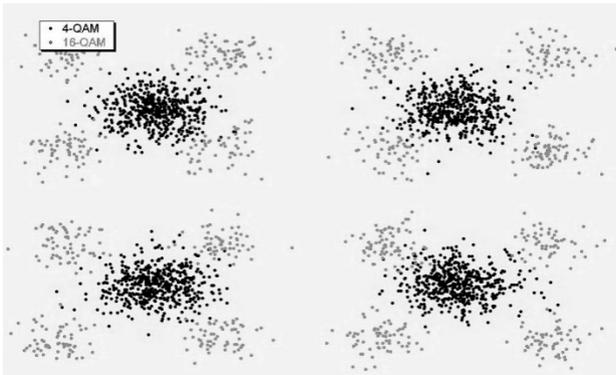


Fig. 10b. Constelación para *m*QAM a 60 Km. (4 QAM: azul y 16 QAM: rojo).Figura tomada del software VPI Photonic (licenciado en la Universidad de Antioquia, Medellín).

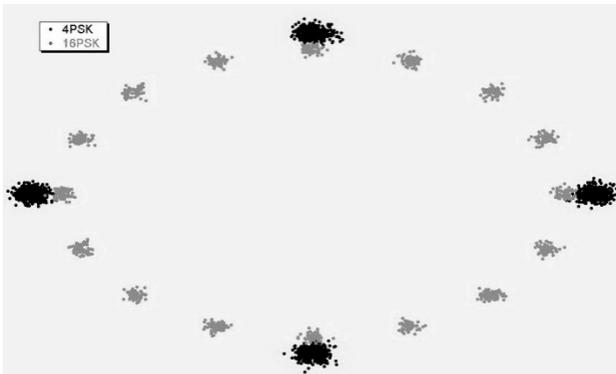


Fig.11a. Constelación para *m*PSK a 30Km. Figura tomada del software VPI Photonic (licenciado en la Universidad de Antioquia, Medellín).

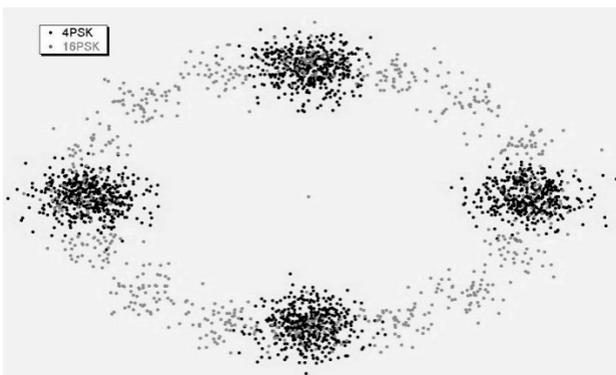


Fig.11b. Constelación para *m*PSK a 60Km. Figura tomada del software VPI Photonic (licenciado en la Universidad de Antioquia, Medellín).

En términos de la distancia alcanzada antes de utilizar el primer circuito regenerador de señal, es posible afirmar que con la arquitectura planteada, cuando los datos son mapeados en 4 PSK la distancia alcanzada es de 68.3 Km, manteniendo tasas de error de símbolo de  $10^{-3}$ .

Cuando se utilizan mapeos de 16 niveles se alcanzan distancias de 50 Km para el caso de modulaciones en fase y de 60 Km para la modulación en cuadratura. Este resultado, sumado a la eficiencia espectral lograda con el esquema 16 QAM, muestra que ésta es la mejor alternativa para mapear la información y transmitirla en un sistema de RoF con una portadora de 900 MHz.

Los esquemas de modulación que emplean pocos bits por símbolo, es decir, los que no utilizan OFDM pueden alcanzar mayores distancias sin requerir regeneración de señal; sin embargo, este aumento en el alcance posee una limitación grande en términos de la tasa de transferencia de bits y de la eficiencia espectral lograda.

Como trabajo futuro se espera hacer nuevas pruebas en otras bandas de frecuencia de sistemas celulares y también utilizando fibras ópticas con diferentes características de dispersión.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo del Comité para el Desarrollo de la Investigación (CODI) de la Universidad de Antioquia, a través del proyecto con código MC 07-1-11.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cisco Systems. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2011–2016. Technical Report, 2012.
- [2] Chun-Ting, L., Chen J., Po-Tsung S., Wen-Jr J., y Sien C. Ultra-High Data-Rate 60 GHz Radio-Over-Fiber Systems Employing Optical Frequency Multiplication and OFDM Formats. *J. LightwaveTechnology.*, 28(16): 2296-2306, 2010.
- [3] Herschel R. y Schäffer C.G. Radio-Over-Fiber Systems for Next Generation Wireless Access. *International Workshop on Photonics and Microsystems*, 54-58, 2011.

- [4] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: AirInterface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands and Corrigendum 1, 2006.
- [5] Favalli L., Savazzi P., Somma S., "Improved Block DFE Equalization for Mobile WiMAX OFDM Systems", Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference. GLOBECOM, 3384-3388, 2007.
- [6] Vassis D., Kormentzas G., Rouskas A. y Maglogiannis L., "The IEEE 802.11g Standard for High Data Rate WLANs", IEEE Network, 19(3): 21-26, 2005.
- [7] Tang S., Li Y., Chen X., Guo X., Chen H., y Lin R., The Performance Of 16QAM-OFDM mm-RoF With Pre-distortion Design. SPIE-OSA-IEEE, 8310: 1-6, 2011.
- [8] Chen L., et al. A Radio-Over-Fiber system with photonic generated 16QAM OFDM signals and wavelength reuse for upstream data connection," Optical Fiber Technology, 15: 222-225. March 2009.
- [9] Liu B., Xin X., Zhang L., Zhao K. y Yu C. Broad Convergence of 32QAM-OFDM ROF and WDM-OFDM-PON System Using an Integrated Modulator for Bidirectional Access Networks. Proceedings of the National Fiber Optic Engineers Conference, OSA, Technical Digest (CD), Optical Society of America, 1-3, 2010.
- [10] Wang J., Zhou X., Xu Y. y Wang W. Performance Improvement of OFDM-ROF System With Clipping and Filtering Technique, IEEE Transactions on Consumer Electronics, 54(2): 296-299, 2008.
- [11] Al-Noor M., Loo K.K. y Comley R. 120 Mbps Mobile WiMAX Scalable OFDMA Signal Transmission over RoF with SMF, DCF and Chirped FBG for Fiber Length of 792 km. 6th International Conference on Wireless and Mobile Communications, 373-377, September, 2010.
- [12] Kostko I.A., Pasandi M.E., Sisto M.M., Larochelle S., Rusch L., y Plant D.V., A Radio-Over-Fiber Link For OFDM Transmission Without RF Amplification. IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting Conference Proceedings, 339-340, 2007.
- [13] Liu B., Xin X., Zhang L., Zhao K. y Yu C. Broad Convergence of 32QAM-OFDM ROF and WDM-OFDM-PON System Using an Integrated Modulator for Bidirectional Access Networks. National Fiber Optic Engineers Conference, 1-3, 2010.
- [14] Tang P.K., Ong L.C., Alphones A., Luo B. y Fujise M. PER and EVM measurements of a radio-over-fiber network for cellular and WLAN system applications. Journal of Lightwave Technology, 22(11): 2370-2376, 2004.
- [15] Kosek H., He Y., Gu X. y Fernando X.N. All Optical Demultiplexing of WLAN and Cellular CDMA Radio Signals. Journal of Lightwave Technology, 25(6): 1401-1409, 2007.
- [16] Als A., y Ghassemlooy F.Z. Bit error rate analysis of an all-optical buffer employed in a soliton based optical time division multiplexed transmission system. Optics Communications, 238(4-6): 281-290, 2004.
- [17] Zhao L., Sun, J. y Huang, D. Photonic generation of ultra-wideband signals by exploiting gain saturation of dark pump pulse with double undershoots in a highly nonlinear fiber. Optics Communications, 284(6): 1669-1676, 2011.
- [18] Mizuochi T., Miyata Y., Kobayashi T., et al. Forward Error Correction Based on Block Turbo Code With 3-Bit Soft Decision for 10-Gb/s Optical Communication Systems. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 10(2): 376-386, 2004.
- [19] Duong T., Genay N., Chanclou P., Charbonnier B., y Marzin A.P. 10Gbit/s transmission over 2.5GHz bandwidth by direct modulation of commercial VCSEL and multi-mode FP lasers using Adaptively Modulated Optical OFDM modulation for Passive Optical Network. 34<sup>th</sup> European Conference on Optical Communication, 2008.
- [20] Tobón D.P., Gaviria N. Análisis de métricas de calidad de servicio para la configuración del protocolo CSMA/CA en redes de sensores inalámbricas de área corporal. Revista Ingeniería y Desarrollo, 30(1): 101-124, 2012.