

# Influência do número de símbolos de treinamento na transmissão em fibra óptica para sistemas OFDM e SC-FDE

Rafael Nerone Gadens, Bruno Sens Chang, Paulo de Tarso Neves Junior e Alexandre de Almeida Prado Pohl

**Resumo**—O presente trabalho compara o desempenho dos sistemas óticos OFDM e SC-FDE com a variação do número de símbolos de treinamento. A métrica da comparação foi o EVM. Símbolos foram transmitidos a uma taxa de 8 Gbps, utilizando uma modulação 16-QAM por trechos de fibra óptica de 11,03 km e 22,06 km, com 1 a 50 símbolos de treinamento. Obteve-se uma estimativa do número de símbolos de treinamento a partir da qual os sistemas não apresentam ganhos significativos em termos de EVM, tornando desnecessário o envio de um número maior de símbolos de treinamento.

**Palavras-Chave**—Comunicações ópticas; OFDM; SC-FDE; Estimção de canal

**Abstract**—This work compares the performance of OFDM and SC-FDE systems through the EVM metric, by varying the number of training symbols. Symbols were transmitted with a 8 Gbps data rate using a 16-QAM modulation, through an optical fiber link with lengths of 11,03 km and 22,06 km; the training symbols number varied from 1 to 50. An estimate was achieved for the number of training symbols from which the systems do not show significant gains in terms of EVM, making it unnecessary to send a larger number of training symbols.

**Keywords**— Optical Communications; OFDM; SC-FDE; Channel estimation.

## I. Introdução

As técnicas de modulação podem ser classificadas em dois grandes tipos: Portadora Única e Multiportadora. As técnicas de Portadora Única foram as mais utilizadas em sistemas óticos nas últimas décadas; porém, técnicas Multiportadoras vêm sendo intensamente estudadas para as redes óticas das próximas gerações, principalmente pela alta eficiência espectral e facilidade de adaptação às variações na taxa de transmissão.

A evolução dos sistemas multiportadoras no ambiente ótico está interligada ao avanço das técnicas de processamento digital e aos dispositivos eletrônicos cada vez mais rápidos, cujos preços diminuem a cada ano. Através da aplicação do processamento digital de sinais, com a utilização dos sistemas multiportadoras, é possível compensar a dispersão cromática, implementar equalizadores configuráveis e adaptar diversos tipos de aplicações óticas [1].

Em um sistema de comunicação ótica é de suma importância uma correta estimção do canal no receptor. A

estimção precisa do canal no domínio da frequência no receptor para os sistemas que empregam equalização neste domínio é necessária para que estes, através da equalização, consigam compensar os efeitos da dispersão cromática e da dispersão de modo de polarização de forma eficiente. Alguns métodos já foram propostos para esta tarefa, como estimção cega baseada em algoritmos de gradiente, inserção de pilotos no bloco e sequências de treinamento [2]. O presente trabalho se concentra nesta última abordagem, que oferece uma convergência mais rápida e uma complexidade computacional reduzida.

Na transmissão ótica, a estimativa do canal obtida no receptor é ruidosa. Por este motivo, para aumentar a precisão da estimção emprega-se a média de vários símbolos de treinamento transmitidos como a estimativa do canal no domínio da frequência, que será utilizada no processo de equalização dos símbolos posteriormente transmitidos. Os símbolos de treinamento também podem permitir a obtenção de ganhos na redução do *overhead* aumentando a eficiência espectral, além de ganhos de sincronismo [3].

Entretanto, se símbolos em excesso forem utilizados para este processo de treinamento a eficiência de transmissão será reduzida, uma vez que a taxa líquida de dados úteis será diminuída. Assim, o objetivo deste trabalho é investigar a relação entre o número de símbolos de treinamento utilizados pelo estimador do canal e o desempenho de erro do sistema, que será melhor com uma estimativa mais precisa da resposta em frequência do canal.

Assim, comparou-se o desempenho da técnica multiportadora OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) com a uniportadora SC-FDE (*Single Carrier with Frequency Domain Equalization*) por meio do cálculo do EVM (*Error Vector Magnitude*), a fim de determinar a sensibilidade de tais sistemas à variação do número de símbolos de treinamento e estimar um número de símbolos de treinamento a partir do qual os dois sistemas não obterão ganhos significativos de desempenho.

A continuação do presente trabalho é organizada da seguinte maneira: a Seção II apresenta uma descrição dos sistemas que foram considerados; já a Seção III discorre sobre a metodologia utilizada para os experimentos. A Seção IV mostra os resultados obtidos e sua respectiva discussão, enquanto que a Seção V conclui o trabalho.

## II. Descrição do Sistema

Nos sistemas OFDM a largura de banda total do canal de transmissão é dividida em sub-bandas, tornando possível a transmissão do fluxo de dados de forma paralela através das diversas subportadoras correspondentes a cada sub-banda. Essa técnica torna o OFDM menos sensível a degradações do canal de comunicação, tal como o efeito de interferência intersimbólica (ISI – *Intersymbol Interference*), fazendo com que o sinal transmitido em cada subportadora sofra um desvanecimento plano.

O sinal OFDM discreto é dado por:

$$s(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi nk/N}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (1)$$

onde  $X(k)$  representa os símbolos de entrada (complexos) modulados em  $N$  subportadoras, com  $k = 0, 1, \dots, N-1$ . Para implementar sistemas OFDM geralmente usa-se o algoritmo de transformada rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*).

Na Fig. 1 apresenta-se o diagrama de blocos de um enlace OFDM. No transmissor, o fluxo de dados de entrada é mapeado numa sequência de  $N$  QAM símbolos  $X(k)$ ,  $k = 0, 1, \dots, N-1$ . Esta sequência é então processada pelo bloco IFFT (*Inverse FFT*), o qual gera um conjunto de  $N$  subportadoras ortogonais entre si e moduladas com o sinal QAM, formando o símbolo OFDM discreto. A cada símbolo OFDM é adicionado o Prefixo Cíclico (CP - *Cyclic Prefix*), que serve para aumentar a robustez do OFDM contra ISI e possibilitar uma fácil equalização. Posteriormente o sinal é convertido para o formato analógico pelo DAC, formando o sinal OFDM em banda básica. Dependendo da aplicação específica, este sinal pode modular uma portadora de RF antes de ser enviado ao meio de transmissão.

No lado do receptor, após a filtragem da portadora de RF, o sinal OFDM banda básica é convertido de analógico para digital pelo ADC. Em seguida, o CP é removido e o símbolo OFDM é demodulado através de um algoritmo FFT. O sinal QAM de cada uma das  $N$  sub-portadoras é processado por um equalizador de 1 *tap*, o qual é implementado no domínio da frequência. Ao final do processo o sinal QAM é demodulado, recuperando-se os dados transmitidos.

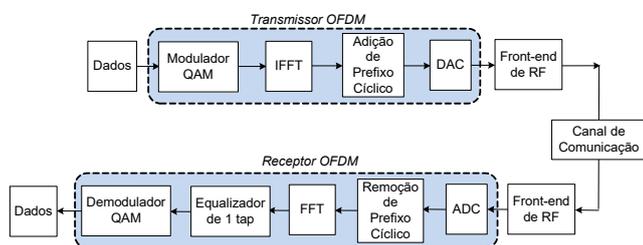


Fig. 1. Diagrama de blocos do sistema OFDM.

São consideradas como principais desvantagens do sistema OFDM a sensibilidade ao ruído de fase e frequência e os altos valores de PAPR (*Peak to Average Power Ratio*). Uma maneira de superar algumas das limitações do OFDM é o uso dos sistemas de portadora única com equalização no domínio da frequência (SC-FDE) [5,6], geralmente usada para o *uplink* em comunicação sem fio. A técnica de portadora única SC-FDE é compatível com a técnica multiportadora OFDM. É

possível fazer uma equivalência entre o SC-FDE e o OFDM por meio do tamanho de bloco e da resolução na equalização na frequência: utilizando uma resolução de equalização e um tamanho de bloco adequados (tamanho da FFT/IFFT) pode-se implementar um sistema SC-FDE equivalente a um sistema OFDM com um certo número de subportadoras.

O uso de sistemas SC-FDE facilita a tarefa de amplificação dos sinais para transmissão em longas distâncias; esta possibilidade ocorre devido à menor faixa de amplitude do sinal transmitido e, por consequência, à baixa PAPR do sinal de portadora única quando comparado com o sinal OFDM [7]. Desta forma, distorções introduzidas pela utilização das regiões não-lineares do amplificador são evitadas. Além disso, os sistemas SC-FDE são mais resistentes aos *offsets* de frequência de portadora (CFO).

O sistema SC-FDE emprega transmissão em blocos como os sistemas OFDM; da mesma forma que os sistemas multiportadora, um prefixo cíclico é adicionado ao bloco a ser transmitido de forma a eliminar a interferência entre blocos. Na recepção, o prefixo cíclico é retirado e o sinal recebido é convertido para o domínio da frequência, onde ele é equalizado. Finalmente, este símbolo equalizado é convertido para o domínio do tempo, no qual a decisão dos símbolos é feita.

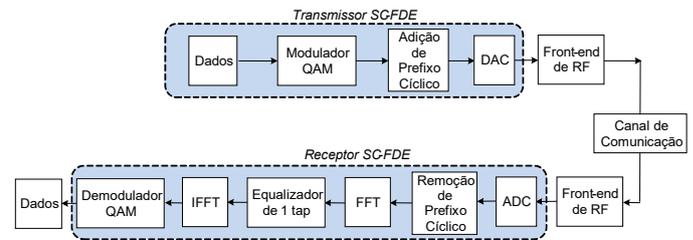


Fig. 2. Diagrama de blocos do sistema SC-FDE.

A equalização no domínio da frequência em sistemas SC-FDE é realizada bloco a bloco. Desta forma, técnicas de máxima verossimilhança são impraticáveis do ponto de vista computacional se o tamanho do bloco for grande. Assim, técnicas de equalização lineares subótimas, mas de complexidade computacional reduzida, são empregadas. Um exemplo destas técnicas é a de forçamento a zero, onde a interferência entre símbolos é completamente eliminada. O equalizador de forçamento a zero  $\mathbf{R}_{ZF}$  pode ser expresso por

$$\mathbf{R}_{ZF} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H, \quad (2)$$

onde  $\mathbf{H}$  é uma matriz contendo em sua diagonal principal a resposta em frequência do canal a ser equalizado e  $\mathbf{H}^H$  seu conjugado Hermitiano. Esta resposta ao impulso deve ser estimada periodicamente.

## III. Metodologia

Como visto nas Fig. 1 e Fig. 2, sistemas ópticos OFDM e SC-FDE necessitam de conversores Digital/Analógico no transmissor e Analógico/Digital no receptor. Em substituição a tais conversores, o sistema analisado no presente trabalho utilizou como transmissor um Gerador de Ondas Arbitrárias (*AWG – Arbitrary Waveform Generator*, KEYSIGHT M8195A – 65 GSa/s) e, como receptor, um osciloscópio de alto desempenho (KEYSIGHT DSO91204A - 12 GHz, 40 GSa/s). Além disso, foram utilizados um laser sintonizável (SANTEC TSL-510), um modulador Mach-Zehnder de

intensidade (COVEGA Mach-10 002: Zero Chirp Intensity Modulator), uma fonte DC ajustável de bancada (TEKTRONIX PS280) e um módulo fotodetector (DISCOVERY SEMICONDUCTOR 10 GHz Linear PIN-TIA Optical Receiver) com largura de banda de 10 GHz.

### A. Arranjo Experimental

Foi montado o arranjo experimental mostrado na Fig. 3. O laser sintonizável foi ajustado para operar em 1550 nm e 5 dBm de potência óptica de saída. O modulador, com tensão de meia onda  $V_{\pi} = 5,2$  V, foi polarizado no ponto de quadratura, onde apresenta maior linearidade. O AWG operou a 40 GSa/s e o osciloscópio operou também a 40 GSa/s com 800 kpts de profundidade de memória.

A alta potência de saída do laser (5 dBm) utilizada no experimento pode ser explicada devido às perdas de inserção do modulador Mach-Zehnder (aproximadamente 6 dB) e demais conexões e emendas no polarizador e cabos ópticos.

Os sinais ópticos modulados foram transmitidos para o módulo fotodetector através de trechos de fibra óptica monomodo padrão (SMF) com comprimentos de 11,03 km e 22,06 km.

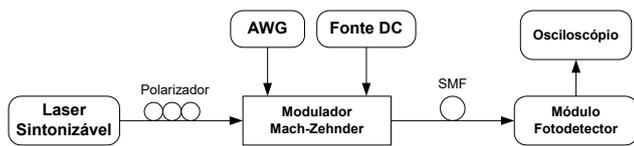


Fig. 3. Diagrama do arranjo experimental. Não foi usado um amplificador de RF entre o AWG e o modulador Mach-Zehnder.

Na recepção, os dados capturados pelo osciloscópio são armazenados e processados *offline* por códigos gerados também em Matlab. Tanto para o sistema OFDM como para o SC-FDE, foi aplicado um equalizador de 1 *tap* utilizando critério de forçaçem a zero.

## IV. Resultados

Os parâmetros usados para os sistemas OFDM e SC-FDE são mostrados na Tabela I.

TABELA I.

OFDM e SC-FDE	
Frequência RF	4 GHz
Modulação de RF	AM-SSB/SC
Banda lateral	Esquerda
Número de símbolos de treinamento	1 a 50
Taxa de bits	8 Gbps
M-QAM	16
Número de subportadoras (tamanho da FFT/IFFT)	32
Intervalo de guarda	20 %
Portadoras nulas à esquerda	10

O número de símbolos de treinamento foi variado de 1 a 50. A Fig. 4 mostra o EVM (em porcentagem) para a

transmissão em um trecho de fibra de 11,03 km. Observa-se que para apenas um símbolo de treinamento, o SC-FDE apresenta um desempenho muito pior que o OFDM; porém, com o aumento do número de símbolos de treinamento os dois sistemas apresentam desempenhos semelhantes.

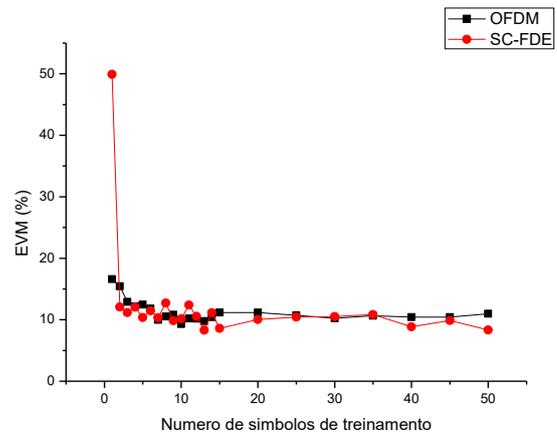


Fig. 4. EVM (em porcentagem) obtido na recepção variando o número de símbolos de treinamento para uma transmissão com 32 subportadoras em 11,03 km de fibra.

Enviar mais do que 15 símbolos de treinamento não traz um ganho significativo no desempenho dos dois sistemas neste cenário.

A Fig. 5 mostra a constelação obtida na recepção com o envio de apenas 1 símbolo de treinamento para os sistemas OFDM e SC-FDE (Fig. 5.a e Fig. 5.b, respectivamente) e com o envio de 10 símbolos de treinamento para os sistemas OFDM e SC-FDE (Fig. 5.c e Fig. 5.d, respectivamente). Observa-se que para 1 símbolo de treinamento o uso do SC-FDE faz o sinal ser recebido totalmente degradado. Por outro lado, o OFDM é menos sensível ao aumento do número de símbolos de treinamento. Para 10 símbolos de treinamento as constelações são semelhantes para os dois sistemas.

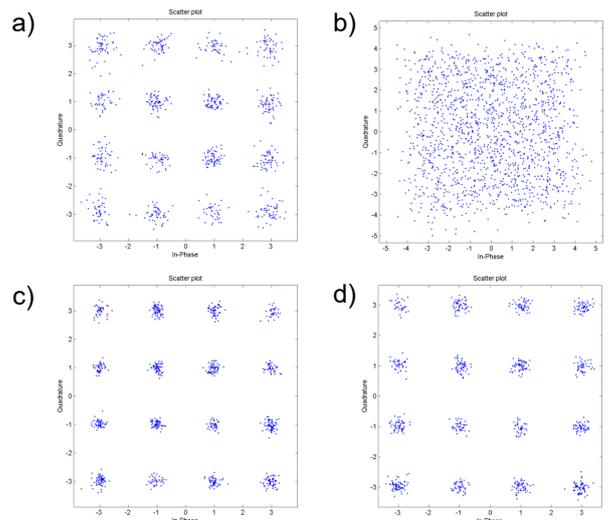


Fig. 5. Constelações obtidas na recepção: a) OFDM com 1 símbolo de treinamento. b) SC-FDE com 1 símbolo de treinamento. c) OFDM com 10 símbolos de treinamento. d) SC-FDE com 10 símbolos de treinamento.

Para o trecho de fibra de 22,06 km também variou-se o número de símbolos de treinamento de 1 a 50, obtendo-se o EVM (em porcentagem) mostrado na Fig. 5. O

comportamento do sistema neste cenário é análogo ao obtido para o trecho de 11,06 km.

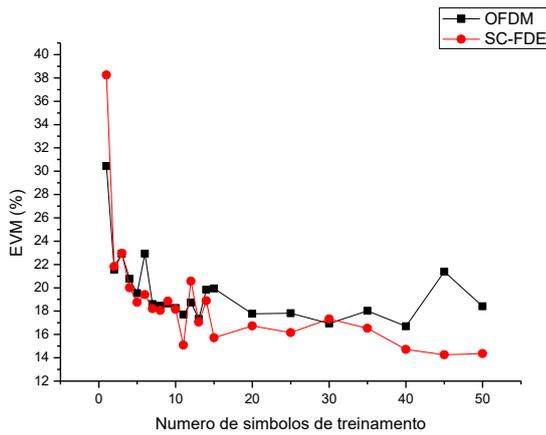


Fig. 6. EVM (em porcentagem) obtido na recepção variando o número de símbolos de treinamento para uma transmissão com 32 subportadoras em 22,06 km de fibra.

Aumentando o número de subportadoras no sistema OFDM por meio do aumento de tamanho da FFT/IFFT, tem-se uma estimação de canal de maior resolução usando os símbolos de treinamento; no caso da SC-FDE este processo equivale ao aumento de tamanho dos blocos, obtendo-se o mesmo efeito. Porém, isso causa um aumento da complexidade do sistema em termos de esforço computacional, uso de memória e tempo de processamento.

Para verificar o efeito do número de símbolos de treinamento utilizados para estimação do canal neste cenário, aumentou-se o número de subportadoras/tamanho do bloco de 32 para 64. Devido às limitações do AWG e do osciloscópio o número máximo de símbolo de treinamento enviados foi 25, mantendo-se os demais parâmetros da Tabela I. O EVM obtido para este cenário de transmissão em um trecho de fibra de 11,03 km é mostrado na Fig. 7.

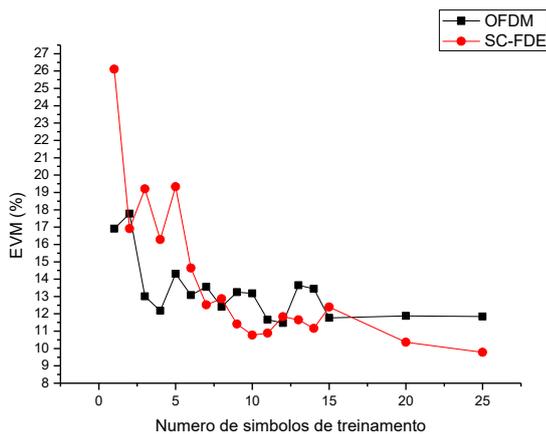


Fig. 7. EVM (em porcentagem) obtido na recepção variando o número de símbolos de treinamento para uma transmissão com 64 subportadoras em 11,03 km de fibra.

Rafael Nerone Gadens, Bruno Sens Chang, Paulo de Tarso Neves Junior e Alexandre de Almeida Prado Pohl, CPGEI – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba-PR, Brasil, E-mails: RN\_Gadens@hotmail.com, bschang@utfpr.edu.br, pneves@utfpr.edu.br, pohl@utfpr.edu.br.

Observa-se uma melhora significativa no desempenho do SC-FDE comparando a Fig. 7 com a Fig. 4. Entretanto, o OFDM não sofreu grandes alterações. Além disso, como no sistema com 32 subportadoras, há uma estabilização no EVM em torno de 15 símbolos de treinamento.

■

## v. Conclusões

Pelo presente trabalho conclui-se que o sistema OFDM é menos sensível que o SC-FDE a um baixo número de símbolos de treinamento e ao aumento do número de subportadoras (aumento de blocos) para curtas distâncias. Porém, aumentando os símbolos de treinamentos os dois sistemas apresentam desempenhos semelhantes. A partir de 15 símbolos de treinamento ambos os sistemas não apresentam ganhos consideráveis analisando o EVM. Dessa forma, torna-se desnecessário o envio de um número maior de símbolos de treinamento, envio este que penaliza a taxa de dados úteis dos sistemas.

## Agradecimentos

Rafael Nerone Gadens agradece à Fundação Araucária pelas bolsas de Iniciação Científica através do convênio 330/2014. Os autores agradecem a FINEP através do projeto CTinfra/2011.

## Referências

- [1] J. Armstrong, "OFDM for optical communications", *Journal of Lightwave Technology*, v. 27, no. 3, pp. 189-204, 2009.
- [2] A. V. Tran, C. Zhu, C. C. Do, S. Chen, T. Anderson, D. Hewitt e E. Ska das, "8x40-gb/s optical coherent pol-mux single carrier system with frequency domain equalization and training sequences," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, no. 11, pp. 885-887, 2012.
- [3] R. G. Trentin, Técnicas de processamento MIMO-OFDM aplicadas à radiodifusão de televisão digital terrestre, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2006.
- [4] E. V. Pereira, Transmissão de Sinais OFDM com Envoltória Constante em Sistemas Ópticos com Detecção Coerente, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFES – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2017.
- [5] D. Falconer, S. Ariyavisitkul, A. Benyamin-Seeyar, and B. Eidson, "FrequencyDomain Equalization for Single-Carrier Broadband Wireless Systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 4, pp. 58-66, 2002.
- [6] N. Benvenuto e S. Tomasin, "On the comparison between OFDM and Single Carrier Modulation with a DFE using a Frequency-Domain Feed-Forward Filter," *IEEE Transaction Communications*, vol. 50, no. 6, pp. 947-955, 2002.
- [7] R. Mesleh, "OFDM and SCFDE performance comparison for indoor optical wireless communication systems," in *19th International Conference on Telecommunications (ICT)*. IEEE, 2012, pp. 1-5.