

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/327780874>

O-OFDM: fundamentos e desafios tecnológicos

Conference Paper · September 2018

CITATIONS

0

READS

260

4 authors:



Daniel Pataca

Daniel Pataca Consultoria em Inovação Ltda

41 PUBLICATIONS 128 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Rafael J. L. Ferreira

12 PUBLICATIONS 24 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Diego Dourado

University of São Paulo

19 PUBLICATIONS 19 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Mônica de Lacerda Rocha

University of São Paulo

76 PUBLICATIONS 286 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Project All-optical fast fourier transform for processing an optical OFDM superchannel [View project](#)



Project SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronic Conference [View project](#)

O-OFDM: fundamentos e desafios tecnológicos

(artigo convidado)

Daniel Moutinho Pataca
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Paulista – UNIP
Campinas, Brasil
daniel.pataca@docente.unip.br

Rafael Jales Lima Ferreira, Diego Marques Dourado,
Mônica de Lacerda Rocha
Departamento de Engenharia Elétrica e da
Computação, EESC-USP, São Carlos, Brasil
rafael_jales@hotmail.com

Abstract—Apresentamos uma revisão de alguns conceitos matemáticos e desafios tecnológicos para implementar a técnica OFDM no domínio totalmente ótico. A superação destes obstáculos é necessária para que o O-OFDM emergir, em um futuro próximo, como uma opção técnica e economicamente viável que atende, com eficiência espectral e economia de energia, a sempre crescente demanda de capacidade em sistemas de transmissão de dados.

Palavras-chave—Telecomunicações; Comunicações ópticas; OFDM óptico; Integração fotônica

I. INTRODUÇÃO

Desde o surgimento dos amplificadores a fibra dopada com Erbário e da multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM) no início dos anos 90, tornou-se comum justificar a maioria das pesquisas em sistemas de transmissão ótica de alta capacidade como sendo motivadas pela demanda crescente por largura de banda [1]. Atualmente, à medida que os serviços e aplicativos evoluem, o crescimento da demanda de largura de banda ainda mantém esse argumento válido, embora em um cenário mais complexo onde outros requisitos igualmente importantes, como o aumento da eficiência espectral (SE) e a redução do consumo de energia, devem ser incorporados [2-3]. Neste contexto, duas técnicas de multiplexação se destacam, entre outras tecnologias avançadas que surgiram, para atender a alta eficiência espectral desejada: a multiplexação por divisão de frequência ortogonal óptica (O-OFDM) e o WDM Nyquist (N-WDM) [4-5]. Ambas permitem a sobreposição de subportadoras, nos domínios da frequência e do tempo, respectivamente, conforme ilustrado na Fig. 1. Além disso, ambas são tipicamente associadas à detecção coerente e ao processamento eletrônico que, por um lado, permitem cumprir a especificação de largura de banda mas, por outro lado, aumentam o consumo de energia [6].

Note que, estritamente falando, existem duas maneiras concorrentes para implementar um sinal OFDM no domínio ótico: uma refere-se à geração eletrônica de um fluxo de dados OFDM (RF OFDM) que modula a portadora ótica, técnica geralmente chamada de OFDM coerente (CO-OFDM), e mais comumente investigada para aplicações de redes de acesso [7]. A outra está associada à modulação de subportadoras ópticas fornecidas por um gerador de pente ótico, compreendendo assim um fluxo de dados OFDM totalmente óptico, aqui referido como O-OFDM [5].

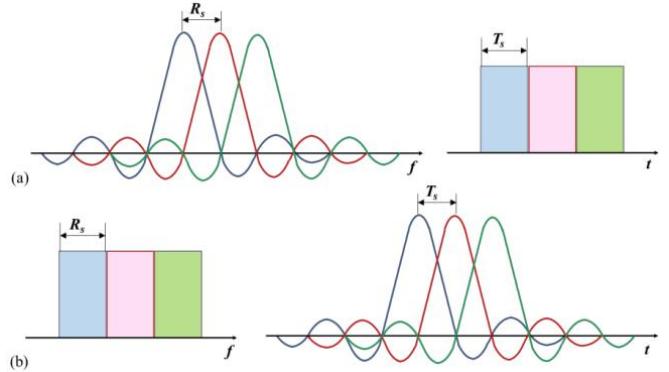


Fig. 1. Sinais (a) O-OFDM e (b) N-WDM representados nos domínios da frequência e no tempo. (R_s e T_s representam a taxa e duração do símbolo, respectivamente).

Neste artigo apresenta-se uma visão geral de conceitos, desafios e desenvolvimentos tecnológicos para implementar a técnica O-OFDM. O artigo destaca principalmente o método interferométrico do processamento totalmente ótico no receptor em um nó intermediário. Esta atenção especial é necessária porque os processos de multiplexação, roteamento, inserção e remoção de subportadoras ópticas não podem violar a condição de ortogonalidade. Matematicamente, os métodos interferométricos operam de uma maneira similar às transformadas rápidas diretas e inversas de Fourier (FFT/IFFT). Nos casos de um grande número de subportadoras foi proposto um método simplificado [8] que utiliza filtros ópticos combinados com acopladores, interferômetros Mach-Zehnder (MZIs), deslocadores de fase e linhas de atraso. Neste artigo explora-se esse método propondo-se o projeto de estruturas mais compactas.

O artigo está organizado da seguinte maneira: na seção II são apresentados os fundamentos da técnica OFDM, incluindo também a geração e as FFT/IFFT ópticas, na III apresenta-se a demonstração experimental de uma FFT óptica, na IV as simulações das FFT/IFFT ópticas e na V a conclusão.

II. FUNDAMENTOS DO OFDM

O conceito do OFDM (RF) foi introduzido por R. W. Chang em 1966. Entretanto, a aplicação da técnica somente foi totalmente explorada depois da evolução da tecnologia dos

circuitos integrados, devido ao processamento computacional necessário para a implementação prática do OFDM.

O OFDM é uma classe especial de um esquema de transmissão paralela, também conhecido como modulação de múltiplas portadoras (MCM) [9]. Ele pode ser implementado por uma série de sinais ortogonais sobrepostos espectralmente, onde a ortogonalidade surge da correlação entre qualquer duas subportadoras. Este conceito é apresentado na Fig. 2, onde uma estrutura genérica MCN utiliza um multiplicador complexo (IQ modulador/demodulador) e requer um detetor ótimo, para cada uma das subportadoras, com um filtro casado com a forma de onda da subportadora. Também se pode utilizar um correlador casado com a subportadora, como apresentado na Fig. 2.

De acordo com a Fig. 2, para um sinal transmitido $s(t)$, c_{ki} é o símbolo de informação i -th na subportadora k -th e s_k é a forma de onda correspondente à k -th subportadora. Assumindo-se que N_s é o número de subportadoras, f_k é a frequência da subportadora, T_s é o período do símbolo e $\Pi(t)$ é a função forma de pulso, segue-se que [9]:

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^{N_s} c_{ki} s_k(t - iT_s) \\ s_k(t) = \Pi(t) e^{j2\pi f_k t} \\ \Pi(t) = \begin{cases} 1, & (0 < t \leq T_s) \\ 0, & (t \leq 0, t > T_s) \end{cases} \quad (1)$$

Para um sinal recebido, $r(t)$, no domínio do tempo, o símbolo da informação detectada c'_{ki} na saída do correlador é então dado por [9]:

$$c'_{ki} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} r(t - iT_s) s_k^* dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} r(t - iT_s) e^{-j2\pi f_k t} dt \quad (2)$$

Em um sistema com múltiplas portadoras, um fluxo de dados serial de alta taxa é dividido em uma série de fluxos de baixa taxa, cada um dos quais sendo modulado em uma subportadora (SC). Em outras palavras, um único fluxo de dados de alta taxa é transmitido por várias subportadoras com taxas menores de tal modo que a largura de banda de cada uma é muito menor do que a largura de banda total do canal. Então, o conceito chave do OFDM é a sobreposição espectral que é viabilizada pela escolha de uma série especial de frequências das subportadoras que são ortogonais mutuamente, permitindo assim uma alta eficiência espectral. A ortogonalidade surge da correlação entre quaisquer duas SCs (''k'' e ''l'') dada por [9]:

$$\delta_{kl} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s_k s_l^* dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \exp(j2\pi(f_k - f_l)) dt = \exp(j2\pi(f_k - f_l)) \frac{\sin(\pi(f_k - f_l)T_s)}{\pi(f_k - f_l)T_s} \quad (3)$$

onde, para um inteiro m , a condição de ortogonalidade estabelece que:

$$f_k - f_l = m \frac{1}{T_s} \quad (4)$$

Na Fig. 3 apresenta-se um desenho esquemático de um transmissor e receptor de um sistema OFDM genérico.

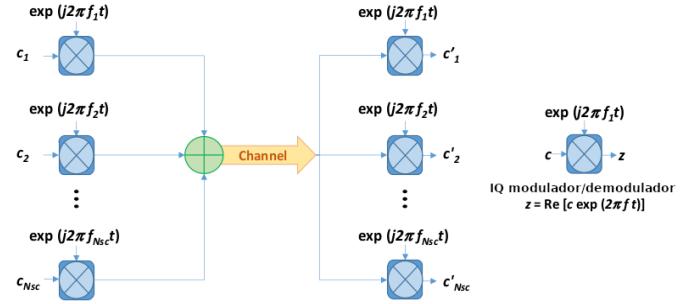


Fig. 2. Esquema de um sistema de transmissão genérico de múltiplas portadoras.

A. Geração do O-OFDM

A possibilidade de se operar com somente uma fonte ótica, para a geração das múltiplas portadoras, significa uma vantagem para a técnica O-OFDM sobre a N-WDM, onde é mandatária a utilização de múltiplas fontes lasers. Neste contexto, um desafio para o projeto do O-OFDM é a construção de uma fonte óptica que gera múltiplas portadoras garantindo sempre a sua condição de ortogonalidade. Uma maneira de garantir a ortogonalidade é utilizar um único laser, semente, para a geração das subportadoras amarradas em frequência e coerentes em fase, que serão moduladas sincronamente. A fonte também deve garantir uma alta capacidade agregada, explorando as técnicas de processamento paralelo, com uma taxa de modulação moderada por portadora e uma alta eficiência espectral.

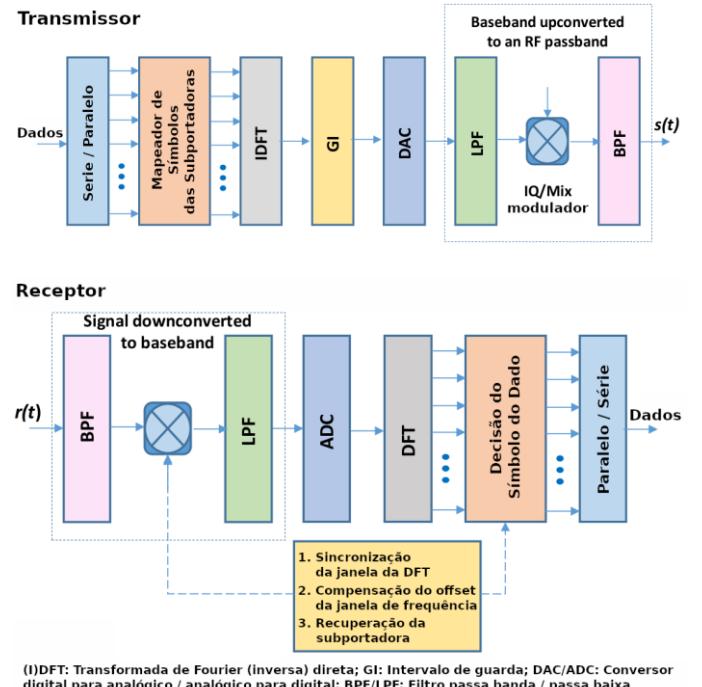


Fig. 3. Esquema de um transmissor e receptor OFDM genérico.

Um gerador de sinal com tais características é conhecido, normalmente, como supercanal ótico O-OFDM [10]. Como as subportadoras são sobrepostas, a interferência entre elas pode ser eliminada, evitando-se deslocamentos de frequência dos canais adjacentes, e que impõe um outro desafio que é separar adequadamente as subportadoras para o seu processamento individual. Assim, o correto processamento de uma subportadora exige entre, entre outras, as seguintes condições:

- A separação entre subportadoras deve ser igual a taxa de símbolos de cada subportadora modulada
- Os símbolos nas subportadoras moduladas devem ser sincronizados no tempo.
- A largura de banda do transmissor deve ser grande o bastante para acomodar todas as subportadoras.

A seguir apresenta-se três técnicas para a geração de um pente de frequências óticas ortogonais utilizadas como um gerador ótico O-OFDM [10]:

- Cascata de moduladores Mach-Zehnder/Fase (MZM/PM), Fig. 4(a), normalmente utilizada para gerar sinais de duas a onze subportadoras, esta limitação é determinada pela limitação de largura de banda eletro-ótica dos MZMs/PMs e pela máxima amplitude do sinal do driver. Do not use the word “essentially” to mean “approximately” or “effectively.”
- Deslocamento de frequência recirculante, RFS, Fig. 4(b), baseada na conversão de frequência produzida pela modulação de banda lateral única. Esta técnica permite a geração de um grande número de subportadoras estáveis. Na técnica RFS, um sinal de laser CW (onda contínua) é deslocado em frequência dentro de um loop recirculante devido a um processo analógico de modulação de fase..
- Laser de modo discreto (DM) alimentado por uma onda senoidal, Fig. 4(c), similar ao chaveamento de ganho em lasers semicondutores, o que resulta em um travamento de fase na saída do gerador. Quando comparada com as técnicas mostradas anteriormente esta é relativamente simples e de baixo custo..”

III. FFT/IFFT ÓTICO

Os eventos no domínio do tempo podem ser relacionados a eventos no domínio da frequência através da transformada de Fourier: passar do tempo para a frequência requer a própria transformada de Fourier, enquanto o processo inverso requer a transformada inversa de Fourier. Este procedimento pode ser implementado em várias versões e a escolha de qual usar depende da aplicação pretendida. Neste contexto, o RF-OFDM tornou-se uma técnica importante com a alta capacidade de circuitos integrados modernos para gerar este tipo sinal multiportadora usando o algoritmo inverso da FFT, ou seja, a IFFT, e para reverter o processo, no receptor, usando a transformada direta, ie, a FFT [11].

De forma semelhante, mas não direta, a abordagem totalmente óptica, ou O-OFDM, depende da maturidade de

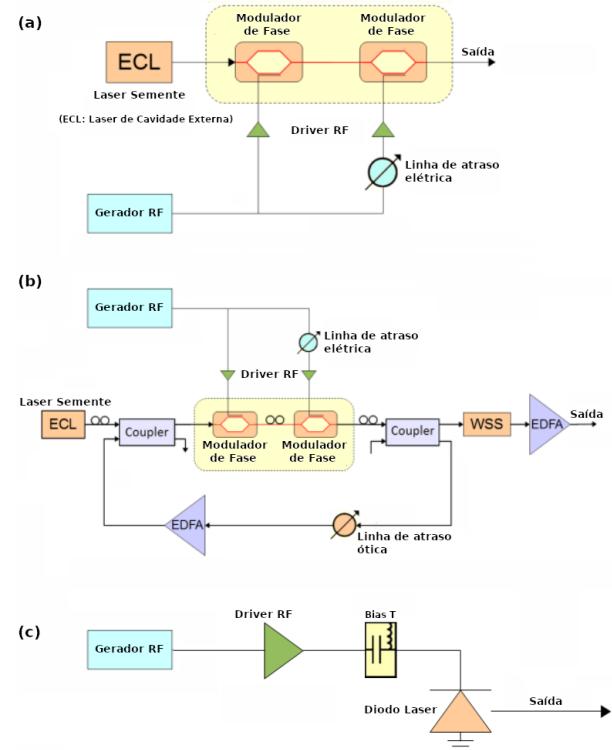


Fig. 4. Esquema de três técnicas de geração de pentes de frequência ótica; (a) Cascata de Moduladores, (b) Deslocamento de frequência recirculante e (c) Laser de modo discreto (DM)

uma tecnologia viabilizadora, que possa permitir que ela se torne tão popular como o RF-OFDM. Tal popularização da técnica, por inferência, deve ser relacionada à contrapartida óptica do algoritmo FFT implementado por um circuito integrado ótico. O uso de ótica integrada (integrated optics, IO) para implementar o algoritmo FFT no domínio ótico foi sugerido por Marhic et al., em 1987 [12], embora na época a IO não fosse suficientemente madura para demonstrações práticas. Em 2001, Siegman et al. propôs uma solução mais viável para a obtenção do DFT de uma matriz óptica amostrada que atravessava uma combinação de acopladores ópticos 3 dB e de deslocadores de fase ópticos [13]. Apesar da dificuldade de ser implementada e estabilizada em montagens discretas, essas estruturas interferométricas têm sido estudadas para o processamento de sinais O-OFDM desde então.

Como o projeto de tais estruturas pode tornar-se muito complexo à medida que aumenta o número de subportadoras, em 2010 Hillerkuss et al. propuseram uma simplificação no método interferométrico que veio a se constituir numa base para o projeto de esquemas confiáveis e menos complexos visando soluções mais econômicas [8]. Nessa mesma linha de aplicação, em 2011, Wang et al. propuseram o uso de grades de guia de ondas convencionais (*arrayed waveguide gratings* - AWG) como filtros espectrais integrados para executar as funções FFT/IFFT ópticas. A proposta de Wang é promissora porque, em comparação com outros circuitos ópticos FFT/IFFT, os AWGs atendem ao requisito de serem estruturas menos complexas, especialmente para um grande número de entradas e saídas [14].

IV. DEMONSTRAÇÃO EXPERIMENTAL DA TÉCNICA FFT ÓTICA

Nesta seção descreve-se a demonstração experimental realizada para validar, em laboratório, a técnica de demultiplexação no domínio ótico, necessária tanto para a remoção de subportadoras num nó intermediário da rede quanto para a deteção do supercanal ao final de um sistema ponto-a-ponto. O experimento base demonstrou a transmissão em back-to-back de um feixe composto por 3 subportadoras espaçadas em 12,5 GHz e a remoção de uma delas pela técnica de processamento ótico O-FFT.

O setup experimental para retirada de uma subportadora de um fluxo O-OFDM com três e as formas de onda do sinal em diferentes partes do circuito são mostradas na Fig. 5. No experimento utilizou-se um gerador com chaveamento do ganho de um laser semicondutor. Este tipo de geração, disponível no laboratório do CPqD, é uma opção mais simples e com potencial de maior facilidade de integração fotônica e economia de energia. O gerador da Pilot Photonics utilizado é uma das poucas fontes comerciais geradoras de pente ótico e a única que é baseada nesta técnica. O O-FFT compreende um interferômetro de atraso, DI, de 2 estágios onde o segundo é substituído por um TBPF WSS (Tunable Bandpass Filter Wavelength Shaper), filtro óptico passa banda [8].

As linhas de pente geradas podem ser vistas na Fig. 5(a), com espaçamento de frequência entre as subportadoras ópticas, de 12,5 GHz. Este valor impõe uma taxa de bits igual a 12,5 GBd para satisfazer à condição de ortogonalidade, o que resulta no espectro visto na Fig. 5(b). Devido à sua disponibilidade laboratorial, o formato de modulação utilizado foi a modulação QPSK (Quadrature Shift Phase Keying), o que resultou em uma taxa de bits de 25 Gb/s/subportadora.

A Fig. 5(c) ilustra o diagrama de olho na saída do gerador PRBS (Pseudo Random Bit Sequence). O número limitado de componentes discretos insensíveis às flutuações de polarização no laboratório reduziu o experimento a três subportadoras, resultando em uma taxa total de 75 Gb/s. A montagem do primeiro estágio DI exigiu o uso de uma bancada óptica para estabilização do subsistema interferométrico, implementado sem um circuito eletrônico de estabilização. Para extrair uma portadora do sinal de 3 subportadoras, foi usada 1 linha de atraso (delay line, DL), um divisor de potência e um acoplador 2 x 2 fabricados com fibra que mantém a polarização (Polarization Maintaining - PM), seguido de um TBPF WSS substituindo o segundo DI.

As Fig. 5(d), (e) e (f) mostram o espectro na entrada do primeiro DI, na entrada do segundo DI (após o EDFA) e na saída do segundo DI, respectivamente. Para avaliar a influência de diafonia e ISI no desempenho da BER, causados pela substituição do segundo DI pelo filtro, dois valores de banda passante do filtro foram testados, 15 GHz e 25 GHz. A configuração incluiu também um EDFA, para compensação de perdas, um VOA, um acoplador óptico, um divisor de potência e um controlador de polarização (Polarization Controller - PC), necessários para o controle do sinal antes de ser detectado pelo receptor coerente.

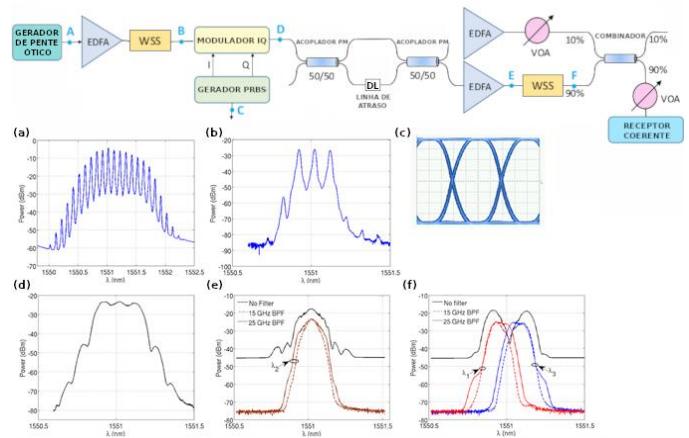


Fig. 5. Setup experimental para remoção de uma subportadora de um feixe ótico OFDM de três: (a) espectro de saída do gerador de pente ótico; (b) espectro do feixe ótico com 3 subportadoras na saída do filtro WSS; (c) diagrama de olho do gerador PRBS; (d) espectro do feixe ótico de 3 subportadoras moduladas; (e) e (fO: espectros na entrada e saída do segundo DI.

O receptor coerente integrado ICR (Integrated Coherent Receiver) é um modelo comercial usado para a recepção de sinais de 28 GBd-QPSK. Os dois sinais elétricos na saída do ICR foram amostrados em 50 GSa/s por um osciloscópio de tempo real de 2 canais (banda de 20 GHz) para o processamento digital off-line.

Para levar em conta as flutuações da medição e para uma melhor avaliação do comportamento do sistema, cada medida foi repetida 60 vezes. A partir desses dados, foram selecionados para avaliação os cinco com melhor desempenho. Os resultados assim obtidos estão resumidos na Fig. 6.

A Fig. 6 mostra a BER versus o OSNR para cada subportadora retirada pelo O-FFT usando os filtros sintonizados em 15 e 25 GHz.

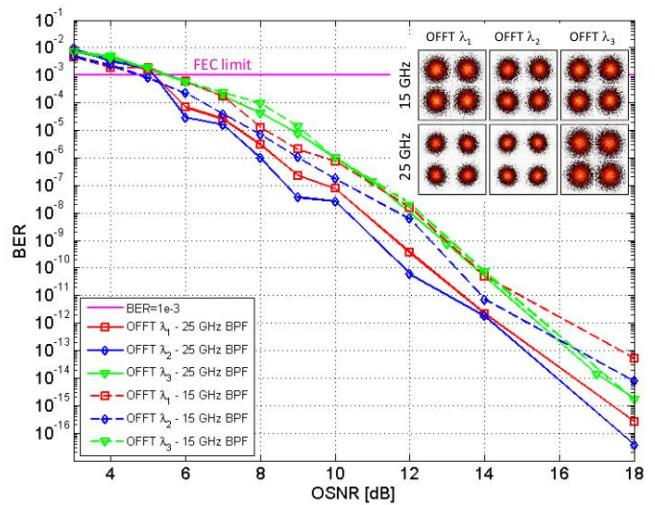


Fig. 6. Resultados Experimentais (BER vs OSNR) para cada subportadora retirada pelo O-FFT no qual um estágio do DI foi substituído por um filtro passa-banda sintonizado em 15 e 25 GHz.

O desempenho com a banda mais estreita (15 GHz) foi pior para as três subportadoras em comparação com seu comportamento com a banda mais larga (25 GHz). Isso aconteceu porque a banda mais estreita cortou os componentes de alta frequência do sinal, distorcendo assim seu diagrama de olho. Note-se que, para ambas as bandas de passagem, a subportadora central (2) apresentou um melhor desempenho do que as subportadoras laterais (1 e 3). Uma possível explicação para esse comportamento é a falta de simetria, causada pela ausência da quarta subportadora, na 4 ordem da O-FFT implementada.

V. SIMULAÇÃO DO SISTEMA ÓPTICO O-IFFT/O-FFT

Nesta seção apresenta-se a demonstração teórica completa que incluiu os estágios de inserção e remoção de subportadora pelas técnicas de O-IFFT/O-FFT, operação de multiplexação/demultiplexação respectivamente. Para validação desta etapa do estudo, a simulação no Optisystem 13.3 foi calibrada com os dados da demonstração experimental. Na Fig. 7 apresenta-se o diagrama esquemático do circuito óptico simulado no simulador Optisystem e formas de onda capturadas em alguns pontos do circuito.

Para validação da técnica O-FFT implementada no simulador, uma configuração semelhante ao experimento foi configurada no simulador. Como os dispositivos ópticos utilizados no experimento apresentam perda de inserção, eles exigem o uso de amplificadores ópticos. Isso pode ser evitado na simulação, mas um cuidado especial foi tomado para controlar o nível OSNR de modo a ficar compatível com o experimento. Para realizar a calibração da simulação com o experimento, foi utilizado apenas o primeiro estágio do interferômetro de atraso, DI, sendo que o segundo estágio foi substituído por um filtro óptico gaussiano (Optical Bandpass Filter - OBPF) com (25 e 15 GHz). Como no experimento, os melhores resultados foram obtidos para 25 GHz. Portanto, os resultados apresentados estão todos relacionados a essa largura de banda. Como no experimento, na simulação foi utilizado um receptor coerente padrão e o módulo DSP correspondente. Na entrada do receptor, um bloco chamado "controlador OSNR" foi implementado para manter a OSNR no mesmo nível do experimento.

A Fig. 7 mostra as configurações da simulação, que consistem de um transmissor O-OFDM, um bloco O-FFT configurado conforme o experimento, outro bloco denominado O-IFFT, e o bloco da recepção para fazer a análise de cada canal, após a demultiplexação óptica.

O bloco transmissor é composto por um gerador de pente óptico, que gera as subportadoras desejadas a partir de um laser semente, a técnica utilizada no gerador das subportadoras foi a mesma do experimento (ou seja, chaveamento de ganho do laser). Na etapa de modulação foi utilizado um DEMUX para separar as subportadoras. Para manter a similaridade com o experimento, neste primeiro caso foram selecionadas as mesmas 3 subportadoras, que a seguir foram moduladas a 25 Gbaud da mesma forma que no experimento.

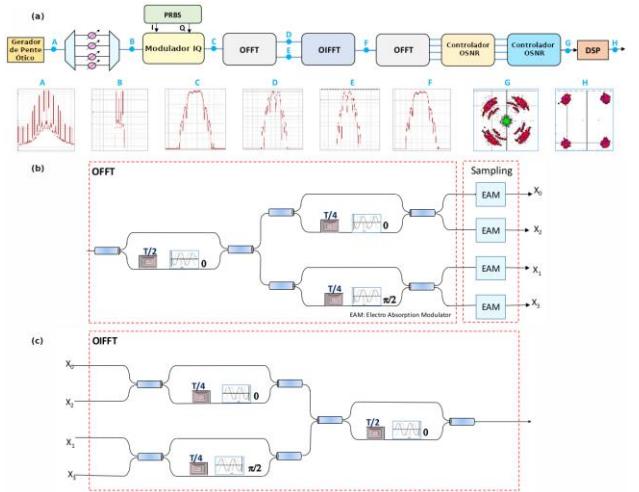


Fig. 7. (a) Diagrama de blocos do circuito óptico simulado do sistema completo e formas de onda em diversos pontos do circuito; (b) detalhamento do bloco OFFT; (c) detalhamento do bloco OIFFT.

Após o transmissor, foi utilizado um bloco O-FFT, constituído de acopladores ópticos, divisores passivos, time Delays e phase shift, conforme visto na Fig. 7(b). A saída deste bloco é injetada em moduladores de eletroabsorção, funcionando como gates, de modo que seja realizada a amostragem das subportadoras. O sincronismo dos gates foi garantido por recuperador de relógio totalmente óptico baseado na conversão espectral linear. Na saída dos moduladores o sinal é inserido em um receptor de acordo com o formato de modulação da subportadora desejada. Após a recepção foi inserido um bloco de processamento digital de sinal para análise das subportadoras selecionadas.

Uma vez validado o simulador com os dados experimentais, não havia mais a necessidade de se implementar, no simulador, uma situação limitante como a imposta na prática por falta de componentes adequados. Desta forma, a simulação foi adaptada para incluir todos os estágios DI, ou seja, três estágios onde o primeiro o atraso é T/2. Em uma de suas duas saídas, um atraso de T/4 foi aplicado e combinado com uma mudança de fase de $\pi/2$, como indicado na Fig. 7(b).

Neste segundo cenário o processador O-FFT é composto por uma cascata de dois DIs, e portas de amostragem (EAM). O primeiro DI suprime cada segunda subportadora, o segundo DI cada quarta subportadora. O O-FFT N = 4 foi capaz de separar 4 subportadoras: X₀ e X₂ (as subportadoras pares) e X₁ e X₃ (as subportadoras ímpares). Após o segundo estágio DI, as 4 subportadoras foram finalmente separadas.

No próximo passo de processamento, foram utilizados moduladores de eletroabsorção como chaves para amostrar cada portadora. Para operar sincronizadamente, os gates foram controlados pelo relógio extraído do supercanal modulado. Depois disso, foi implementada a etapa O-IFFT (semelhante ao FFT, mas com uma ordem inversa de processamento). Tod este conjunto corresponde às funcionalidades de extração e adição como acontece em um nó add/drop.

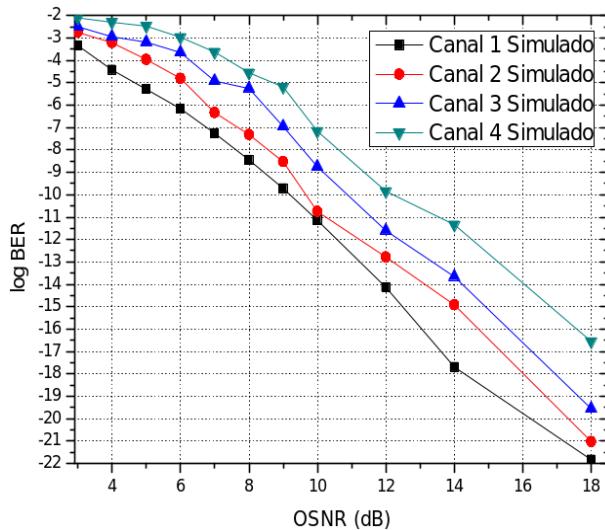


Fig. 8. BER x OSNR simulado para $N = 4$ com operação completa de extração (O-FFT) e inserção (O-IFFT).

No receptor coerente, além do módulo de recuperação de relógio óptico linear, outro IFFT óptico foi usado para a seleção da subportadora, também sintonizado pelo laser oscilador local. Para completar a avaliação dos dados, um DSP analisou as constelações e calculou a BER. Para manter uma semelhança com o experimento, foi incluído um bloco denominado “controlador de OSNR”, constituído por um amplificador óptico (adicionador de ruído) e um acoplador.

Os resultados para as 4 portadoras, depois de serem extraídas, reinseridas e recebidas, são mostrados na Fig. 8 e os valores BER vs OSNR, razoavelmente consistentes para uma configuração back-to-back demonstram a viabilidade da técnica proposta aplicada ao sinal O-OFDM. Notar que, na simulação, a ortogonalidade e o sincronismo entre subportadoras foram mantidos por uma técnica de conversão espectral linear, baseada em filtragem passiva para realizar as funcionalidades de recuperação de relógio e sincronismo de gates de amostragem (moduladores de eletroabsorção).

VI. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma revisão dos fundamentos da técnica O-OFDM, ilustrada por uma simulação de transmissão sistemática calibrada com dados experimentais. Desta forma, demonstrou-se o funcionamento de interferômetros configurados para efetuar a multiplexação e a demultiplexação de subportadoras. O fundamento de sua operação são as transformadas rápidas de Fourier, inversa e direta, respectivamente, implementadas no domínio ótico. Os braços dos interferômetros incluem linhas de atraso e defasadores que

em algumas configurações podem ser substituídos por filtros ou, simplesmente, retirados.

Embora a técnica O-OFDM ainda encontre desafios que precisam ser superados, os avanços recentes em integração fotônica permitem projetar para um prazo relativamente curto a demonstração de uma transmissão O-OFDM estável e economicamente viável. Independentemente do aspecto desafiador de tais projetos, alguns subsistemas ainda requerem simplificações buscando reduzir a complexidade dos circuitos.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem aos pesquisadores Sandro Marcelo Rossi, da Fundação CPQD, e Matheus Martins Rodrigues, da Idea-IP, pela participação na parte experimental do trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] E.B. Desurvire, “Capacity demand and technology challenges for lightwave systems in the next two decades”, *Journal of Lightwave Technology*, V. 24, N. 12, 4697-4710, 2006.
- [2] A. Ellis, N.M. Suibhne, D. Saad, D.N. Payne, “Communication networks beyond the capacity crunch”, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 374: 20150191, 2016.
- [3] A. Udalcovs, R. Schatz, L. Wosinska, and P. Monti, “Analysis of spectral and energy efficiency trade-off in single-line rate WDM links”, *Journal of Lightwave Technology*, V. 35, N. 10, 1847-1857, 2017.
- [4] E. Palkopoulou et al., “Nyquist-WDM-based flexible optical networks: Exploring physical layer design parameters”, *Journal of Lightwave Technology*, V. 31, N.14, 2013.
- [5] S. Chandrasekhar and X. Liu, “OFDM based superchannel transmission technology”, *J. of Light. Technology*, V. 30, N. 24, 3816-3823, 2012.
- [6] X. Liu et al., “Digital signal processing techniques enabling multi-Tb/s superchannel transmission”, *IEEE Signal Processing Magazine*, V. 31, N. 2, 16-24, 2014.
- [7] A. Shieh, H. Bao and Y. Tang, “Coherent optical OFDM: theory and design”, *Optics Express*, V. 16, N. 2, 841-859, 2008.
- [8] D. Hillerkus et al, “Simple all-optical FFT scheme enabling Tbit/s real - time signal processing”, *Optics Express*, V. 18, N. 9, 9324-9340, 2010.
- [9] W. Shieh, I. Djordjevic, “Orthogonal frequency division multiplexing for optical communications”, Academic Press, Elsevier, ISBN 978-0-12-374879-9, 2010.
- [10] D.M. Pataca, F.D. Simões, M.L. Rocha, “Optical frequency comb generator for coherent WDM system in Tb/s applications”, *IEEE/SBMO IMOC Technical Digest*, 2011.
- [11] R.J.L. Ferreira, M.L. Rocha, S.M. Ranzini, “System performance evaluation of an optical superchannel originated from different optical comb generation techniques”, *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, V. 12, N. SI-2, 66-78, 2013.
- [12] M.E. Marhic, “Discrete Fourier transforms by single-mode star networks”, *Optics Letters*, V. 12, N. 1, 63-65, 1987.
- [13] A.E. Siegman, “Fiber Fourier optics”, *Optics Letters*, V. 26, N. 16, 1215-1216, 2001.
- [14] Z. Wang et al ., “Optical FFT/IFFT circuit realization using arrayed waveguide gratings and the applications in all-optical OFDM system”, *Optics Express*, V. 19, N. 5, 4501-4512, 2011.