

# Simulador de Sistemas de Comunicações Óticas: OSIP 2012

Bruno Pereira, Miguel Drummond, Rui Sousa Ribeiro, Paulo Pereira Monteiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nokia Siemens Networks Portugal, S.A.

*Resumo* - Este artigo apresenta as potencialidades e novas funcionalidades do simulador de comunicações óticas, OSIP 2012, para fins pedagógicos e de investigação. São também introduzidos os sistemas coerentes óticos, bem como conceitos que descrevem alguns dos fenómenos resultantes das imperfeições do canal de transmissão. Por fim, recorrendo às novas funcionalidades deste simulador, exemplifica-se uma simulação de um sistema ótico coerente.

**Abstract** - This paper presents the potential of the new version of OSIP, OSIP 2012, considering the application in research and for teaching purposes. Also, the coherent systems are introduced and some of the concepts related with channel impairments. At last using the new features of the simulator, the performance of an optical coherent system will be assessed.

## I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem-se assistido a um grande aumento da largura de banda nas redes, que é resultado do aumento das necessidades dos utilizadores[1]. Como consequência, torna-se necessário desenvolver novos equipamentos e tecnologias [1, 2]. As soluções adotadas visam reduzir o custo necessário por bit de informação e maximizar a distância de transmissão, sem que seja necessário o uso de regeneradores.

A procura de maior capacidade e funcionalidade dos sistemas óticos, levou a um aumento substancial na complexidade dos sistemas de comunicação nas últimas décadas. Devido ao crescente aumento na complexidade e à utilização de novos dispositivos e técnicas de transmissão, a análise e projetos dos sistemas tornam-se cada vez mais difíceis. É assim importante utilizar ferramentas de análise e projeto assistidas por computador.

A transmissão de sinais digitais por fibra ótica representam um bom exemplo da crescente complexidade dos sistemas de transmissão. Nas últimas décadas, o produto taxa-de-transmissão  $\times$  distância aumentou várias ordens de grandeza, atingindo capacidades agregadas por fibra ótica na ordem das dezenas de terabits por segundo.

No entanto, à medida que a capacidade de transmissão nas fibras óticas aumenta, cada vez mais fenómenos têm influência relevante (ruído gerado pelos amplificadores óticos, não linearidade da fibra ótica e dos componentes opto-eletrónicos, dispersão cromática (DC), flutuações na polarização do feixe ótico, etc) e as técnicas de

transmissão e de receção mais complexas, estas últimas baseadas em formatos de modulação digital híbrida (amplitude e fase) e deteção coerente[2]. Nesta sequência, a simulação é atualmente reconhecida como a ferramenta principal para análise e projeto dos sistemas de comunicações óticas.

Vários simuladores foram desenvolvidos na área dos sistemas de comunicações óticas, da qual se destaca a ferramenta comercial VPI photonics<sup>®</sup>[3], com uma grande aceitação nos meios académicos, devido ao seu baixo custo para ensino e permitira simulação de praticamente todos os sistemas óticos [4, 5]. No entanto, este simulador apresenta como desvantagem o facto do utilizador não poder consultar e alterar os modelos dos componentes de acordo com as suas necessidades. Torna-se assim num software de simulação que, apesar de ter muitas potencialidades, limita o seu âmbito a nível de ensino e de investigação. O desenvolvimento do simulador OSIP [6] surge na tentativa de colmatar essas necessidades. Este tornou-se, nos últimos anos, numa ferramenta didática e para fins de investigação. Tem mostrado enormes potencialidades e apresentado alguma evolução ao longo dos anos. A sua fácil adaptação a novos cenários torna-o num software de simulação bastante promissor.

Na secção II é apresentado em detalhe algumas das características e potencialidades do simulador, bem como a sua atualização para os sistemas coerentes. Estes são introduzidos na secção III. Na secção IV pretende-se estudar algumas das imperfeições da fibra das quais resultam limitações de desempenho dos sistemas. O estudo de sistemas, tendo em conta cenários reais, tem uma grande importância no desenvolvimento e teste dos algoritmos, desta forma na secção V são apresentados os resultados da simulação de um sistema que visa compensar as imperfeições estudadas na secção IV. Por fim, na secção VI são apresentadas as conclusões.

## II. OSIP 2012

O simulador OSIP surge em resposta às necessidades de investigação e ensino verificadas nos últimos anos. A sua interface gráfica com o utilizador permite uma fácil implementação dos sistemas óticos no simulador e a sua interpretação é intuitiva. Este permite, por meio da navegação entre janelas gráficas, adicionar e configurar os componentes, assim como os parâmetros de simulação. Uma das grandes vantagens deste simulador é a facilidade que apresenta para consultar o código que descreve cada componente ou subsistema ótico, bem como adicionar

novos componentes. Os utilizadores usufruem assim de uma ferramenta interativa e com uma vasta biblioteca de modelos que tem sido desenvolvida e atualizada pelos alunos e docentes ao longo dos últimos anos.

O simulador foi desenvolvido na linguagem de programação Matlab<sup>®</sup>[7], devido ao conjunto alargado de funções pré-definidas e à sua flexibilidade e simplicidade na manipulação numérica de matrizes e cálculo científico. Algumas das suas potencialidades foram utilizadas para desenvolver o OSIP, nomeadamente o GUIDE (*Graphical User Interface Development Environment*) no desenvolvimento da interface gráfica com o utilizador.

O simulador encontra-se organizado num conjunto de variáveis globais sobre as quais são realizadas todas as operações, desde adicionar, remover ou mesmo configurar componentes. Os componentes e funcionalidades do simulador encontram-se organizados segundo uma árvore de diretórios, figura 1. Assim, o código referente aos componentes, kernel, etc, encontram-se em diretórios dedicados proporcionando uma maior compreensão da estrutura do simulador e logo uma melhor aprendizagem deste. As funções responsáveis pela gestão, escalonamento e comunicação entre processos do simulador encontra-se no diretório *kernel*, podendo algumas funções auxiliares ser encontradas no diretório *utilities*. São exemplo as funções de cálculo de filtros, ajuste de escalas de frequência e tempo e de suporte à interface gráfica.

Existem também diretórios dedicados aos vários componentes dos sistemas óticos, *modules*, e aos seus ícones, *icons*.

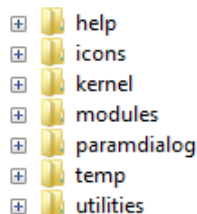


Fig. 1 - Árvore de diretórios do OSIP.

Pretendendo-se adaptar este software de simulação à nova geração de sistemas de comunicações óticas baseados em sistemas coerentes, foram adicionados um grande número de novos componentes bem como novas funcionalidades. A tabela 1 apresenta algumas das novas funcionalidades da versão 2012 do OSIP relativamente à versão anterior (versão 3.1). Uma funcionalidade importante é a possibilidade de simulação de um elevado número de símbolos necessários na estimação de probabilidades de erros pequenas pelo método de Monte-Carlo[8]. O simulador permite que os sinais sejam divididos num determinado número de subsequências (frames) e simulá-los em processos distintos, exigindo assim menores recursos computacionais (memória) e, em

geral, uma diminuição significativa no tempo de computação.

Associado a este método, é também possível estabelecer critérios de paragem da simulação, para um determinado número de erros, que garantam um intervalo de confiança para a probabilidade de erro.

Para a atualização do simulador para sistemas coerentes foram criadas, na transmissão, novas funções que permitem a codificação da informação binária em vários formatos de modulação ótica, nomeadamente BPSK, 4QAM, 16QAM, 32QAM e 64QAM e, na receção, foram implementados os subsistemas de um recetor coerente, incluído o subsistema de igualação para teste de vários algoritmos de compensação dos efeitos lineares e não lineares de um sistema ótico. Outra funcionalidade chave da nova versão do OSIP é a possibilidade de simular a propagação e a interação de vários canais óticos existentes nos sistemas óticos com multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM-Wave Division Multiplexing). Cada um destes canais pode transmitir informação com características diferentes, como formatos de modulação e taxas de transmissão. Tendo em conta todas as atualizações realizadas, e para fazer face aos fenómenos presentes nas comunicações, foram adicionados novos componentes e atualizados alguns dos já existentes. Nos componentes adicionados destacam-se os medidores de probabilidade de erro de bite de amplitude de erro vetorial (EVM - error vector magnitude), codificadores, componentes óticos, eletrónicos e opto-eletrónicos, cujas funcionalidades se encontram na tabela 2.

- Modulação QAM
- Simulação utilizando o método de Monte Carlo
- Canais WDM
- Simulação de DSPs
- Exportação de resultados
- Sistemas Coerentes
- Critérios de paragem em função do número de erros
- Novos componentes (ver tabela 2)
- Emissores / Recetores configurados por software
- Parâmetros e medidas de SNR/OSNR-
- Downsampling/Upsampling
- Visualização de constelações no domínio ótico e elétrico
- Introdução do parâmetro DGD nas fibras óticas
- Medir BER/EVM

Tabela 1- Algumas das novas funcionalidades do OSIP 2012.

- Conversores ADC / DAC	- Amplificador/Amp. de Trans-impedância
- DSP	- Codificador/Descodificador
- Conversores P/S e S/P	- Fotodíodos balanceados
- Modulador IQ	- Combinar e separar Polarizações
- Multiplexer/Desmultiplexer WDM	- Rotação das Polarizações
- Perdas dependentes da Polarização	- Polarizer
- Rotação de fase	- Emissor/Recetor definidos por Software
- Híbrido de 90°	

Tabela 2 - Funcionalidades dos componentes adicionados na versão 2012.

### III. SISTEMAS COERENTES

Recentemente começou-se a explorar a modulação da fase e (ou) amplitude de portadoras únicas ou múltiplas com detecção coerente, técnicas já bem estabelecidas em sistemas de comunicação por radio frequência (RF), para implementar sistemas de transmissão óticos de elevada capacidade. A adoção e extensão destas técnicas da gama dos megabits por segundo utilizada em RF para a gama dos gigabits por segundo permitida pelas fibras óticas, só foi possível pelos recentes avanços na área dos conversores analógico-digital e processadores de sinal digital (DSP) de velocidade muito elevada. Este tipo de recetores tem a capacidade de recuperar a informação de fase, frequência, amplitude e polarização presente no sinal [2, 9]. A informação pode ser assim codificada nas componentes em fase (I) e em quadratura (Q) do sinal e adicionalmente na polarização, permitindo a elaboração de sistemas com elevada eficiência e flexibilidade. Por outro lado, permite a conversão direta dos sinais para o domínio elétrico e a realização da desmodulação diretamente neste meio, reduzindo a complexidade dos sistemas. Adicionalmente, é também possível aplicar técnicas de DSP, no domínio elétrico, tendo como finalidade a compensação das imperfeições do canal. A sua versatilidade permite também que sejam utilizados como recetores de sistemas WDM, podendo ser sintonizados [2, 9, 10]. A figura 2 apresenta um recetor coerente. De uma forma simplificada, do batimento entre o sinal recebido e o oscilador local, é possível obter as componentes em fase e quadratura do sinal modulado. Em (1) e (2) são apresentadas as equações que descrevem a corrente em cada uma das saídas do recetor [2].

$$I_I(t) = R\sqrt{P_s P_{lo}} a(t) e_s e_{lo} \cos[\Delta\omega + \varphi_n(t) + \varphi_0 + \varphi(t)] + i_{sh_I} \quad (1)$$

$$I_Q(t) = R\sqrt{P_s P_{lo}} a(t) e_s e_{lo} \sin[\Delta\omega + \varphi_n(t) + \varphi_0 + \varphi(t)] + i_{sh_Q} \quad (2)$$

Nas equações 1 e 2, R representa a responsividade dos fotodíodos,  $i_{sh_I}$  e  $i_{sh_Q}$  os ruídos quânticos na componente em fase e quadratura,  $\Delta\omega$  o desvio de frequência entre o sinal e o oscilador local,  $P_s$  e  $P_{lo}$  a potência do sinal e do oscilador local,  $e_s$  e  $e_{lo}$  os vetores de polarização do sinal recebido e do oscilador,  $\varphi_0$  a fase inicial,  $\varphi_n(t)$  o ruído de fase do laser,  $a(t)$  e  $\varphi(t)$  a informação de amplitude e fase do sinal. Facilmente se pode verificar que, no caso de  $\Delta\omega = 0$ , receção homódina, as correntes obtidas no domínio elétrico correspondem ao sinal recebido no domínio ótico, mas em banda base. Também, o sinal recebido vem amplificado por um fator  $\sqrt{P_{lo}}$ , permitindo, em geral, uma amplificação do sinal com muito baixo ruído. Em alguns casos pode-se realizar também uma detecção heteródina,  $\Delta\omega \neq 0$ , em que o sinal recebido no domínio elétrico se encontra a uma frequência intermédia.

Uma grande vantagem destes sistemas é também o uso da diversidade de polarização. Esta contempla mais um grau de liberdade na modulação de sinais, e portanto na eficiência de transmissão. A figura 3 apresenta um recetor coerente para um sistema com diversidade de polarização. O recetor é idêntico ao anterior, no entanto, é necessário duplicar o processamento, pelo facto de existirem duas polarizações. Antes da detecção procede-se à separação das polarizações do sinal através do divisor de polarização PBS (Polarization Beam Splitter) e, de forma semelhante, à divisão da potência do oscilador local em duas componentes de igual potência. De seguida, cada uma das polarizações é detetada de forma independente com um sistema idêntico ao da figura 2.

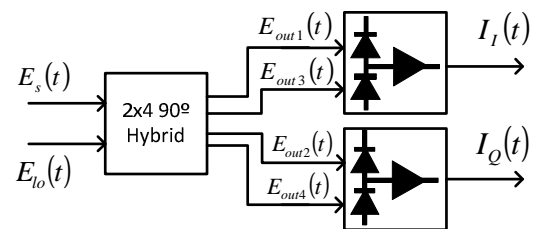


Fig. 2 - Recetor coerente [2].

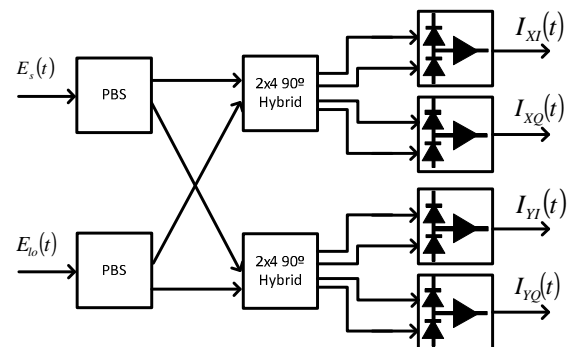


Fig. 3 - Recetor coerente com diversidade de polarização, adaptado de [2]: PBS – Polarization Beam Splitter.

IV. PROPAGAÇÃO DO SINAL E ALGORITMOS DE EQUALIZAÇÃO

A propagação dos sinais na fibra não se processa da mesma forma para todas as componentes espectrais do sinal, por outro lado os componentes não são ideais, podendo resultar comportamentos distintos para diferentes polarizações e/ou cenários. Adicionalmente, flutuações de temperatura, curvaturas ou mesmo pressões sobre a fibra, podem alterar a forma como os sinais se propagam nesta. De todos estes cenários, resultam três fenômenos que ocorrem na fibra: Dispersão cromática, dispersão dos modos de polarização (PMD) e alteração da fase da portadora. Estes fatores provocam uma grande limitação aos sistemas de alto débito. Contudo, com o uso dos sistemas coerentes, foi possível revolucionar os sistemas de transmissão, permitindo aplicar algoritmos de processamento digital de sinal no domínio elétrico de modo a compensar estes efeitos [11, 12]. Atendendo apenas a estes efeitos, o igualador, que pode ser utilizado, está representado na figura 4. A recuperação do sinal pode ser assim dividida em três passos, primeiro procede-se à compensação da dispersão cromática, de seguida a igualação da PMD e por fim a deteção da fase e correção da mesma. Neste artigo, os algoritmos abordados são caracterizados por puramente cegos (“blind”), procurando, de acordo com as propriedades do sinal recebido, adaptar-se e assim compensar o sinal sem que seja necessário introduzir sequências de treino [13].

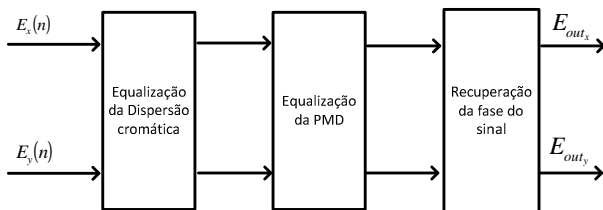


Fig. 4 - Diagrama de blocos do equalizador no domínio elétrico.

A- Dispersão Cromática

A dispersão cromática representa um dos grandes fatores limitativos dos ritmos de transmissão dos sistemas óticos. O alargamento temporal provocado causa interferência entre símbolos, levando à degradação do sinal, e quanto maior for o ritmo de transmissão do sinal menor vai ser a sua tolerância à dispersão [14]. Considerando que o sistema é linear, o efeito da dispersão cromática no impulso  $A(z,t)$  (equivalente passa-baixo do impulso óptico modulado) pode ser descrito pela função diferencial (3) [11].

$$\frac{dA(z,t)}{dz} = j \frac{D\lambda^2}{4\pi} \frac{d^2 A(z,t)}{dt^2} \tag{3}$$

onde  $z$  é a distância de propagação,  $D$  o parâmetro de dispersão [ps/nm.km],  $c$  a velocidade da luz e  $\lambda_0$  comprimento de onda de referência. Resolvendo a equação diferencial obtém-se a resposta impulsiva da dispersão (4) [11].

$$g(z,t) = \sqrt{\frac{c}{jD\lambda^2 z}} \exp\left(j \frac{\pi c}{D\lambda^2 z} t^2\right) \tag{4}$$

Sendo o objetivo compensar a dispersão, o filtro a aplicar deverá ter a resposta inversa (5) [11].

$$g_c(z,t) = \sqrt{\frac{jc}{D\lambda^2 z}} \exp\left(-j \frac{\pi c}{D\lambda^2 z} t^2\right) \tag{5}$$

Facilmente se pode verificar que a resposta do filtro que se pretende implementar apresenta algumas limitações na prática, a sua resposta é não causal e não é limitada nos domínios do tempo e da frequência. A solução passa por truncar a resposta do filtro à frequência de Nyquist, resultando os coeficientes do filtro (6) [11].

$$a_k = \sqrt{\frac{jcT^2}{D\lambda^2 z}} \exp\left(-j \frac{\pi cT^2}{D\lambda^2 z} k^2\right) \tag{6}$$

Onde  $-\left[\frac{N}{2}\right] \leq k \leq \left[\frac{N}{2}\right]$  e  $N = 2 \times \left\lceil \frac{|D|\lambda^2 z}{2cT^2} \right\rceil + 1$ . Esta abordagem

permite implementar um filtro de compensação no domínio do tempo (TDE – Time Domain Equalizer). O filtro é dimensionado de acordo com a dispersão máxima acumulada admissível no sistema. Outras abordagens são possíveis, tal como *Riichi Kudo* apresenta em [15]. Nesta abordagem a igualação é realizada no domínio da frequência (FDE – Frequency Domain Equalizer) sendo a sua função transferência dada por (7):

$$g(f) = \exp\left(-j \frac{\pi L D f^2}{(f_c - f)^2}\right) \approx \exp\left(-j \frac{\pi L D f^2}{f_c^2}\right) \tag{7}$$

Esta implementação exige técnicas de sobreposição que não serão abordadas neste artigo. Outro aspeto que se deve ter em conta é o número mínimo de coeficientes dos filtros necessários para compensar a dispersão. Este ponto foi estudado por *Bernhard Spinnler* em [16] obtendo-se o número mínimo de coeficientes  $N_{CD} = \left\lceil \frac{\tau_{CD}}{T} \right\rceil$ , onde  $\tau_{CD}$  representa o comprimento do canal em dispersão:  $\tau_{CD} = \frac{c}{f_c^2} |D| L B_{opt}$ , em que  $c$  representa a velocidade da luz,  $f_c$  a frequência central do sinal,  $D$  o parâmetro de dispersão,  $L$  o comprimento do troço de fibra e  $B_{opt}$  a largura de banda do sinal.

### B - Dispersão dos Modos de Polarização

Uma fibra ótica monomodo circular suporta dois modos de propagação degenerados com polarizações ortogonais. A dispersão dos modos de polarização é outro fenómeno que limita o ritmo dos sistemas óticos. O fenómeno é provocado pela birrefringência da fibra, levando a que a velocidade de propagação na fibra varie com a polarização. No entanto, existem outros fenómenos que podem provocar a PMD, tais como flutuações de temperatura, imperfeições de fabrico e compressões na fibra [9, 10]. O seu efeito, considerando que não existem perdas dependentes da polarização, pode ser representado pela função de transferência (8), em que  $U_i(f)$  representa a Matriz de Jones (9) [17, 18].

$$H(f) = \prod_{i=1}^N U_i(f) \quad (8)$$

$$U_i(f) = \begin{pmatrix} u_i(f) & v_i(f) \\ -v_i^*(f) & u_i^*(f) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{j(\phi_i + 2\pi\tau_i)/2} & 0 \\ 0 & e^{-j(\phi_i + 2\pi\tau_i)/2} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\alpha_i) & \sin(\alpha_i) \\ -\sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) \end{pmatrix} \quad (9)$$

Em (9)  $\tau_i$  representa o atraso de grupo diferencial entre as polarizações, DGD - Differential Group Delay,  $\phi_i$  o ângulo de rotação na vertical que está compreendido entre  $-\frac{\pi}{2} \leq \phi_i \leq \frac{\pi}{2}$  e  $\alpha_i$  o ângulo de rotação na horizontal compreendido entre  $0 \leq \alpha_i \leq 2\pi$ . O filtro de igualação deverá ser capaz de determinar estas variáveis e compensar o sinal. Um algoritmo de compensação frequentemente utilizado é o CMA (Constant Modulus Algorithm). Este recorre a um filtro MIMO (Multiple Input Multiple Output) adaptativo, figura 5, cujas equações de atualização dos coeficientes são apresentadas em (10) [19].

$$\begin{aligned} h_{xx} &= h_{xx} + \mu \mathcal{E}_x x_{out} x_{in}^* \\ h_{xy} &= h_{xy} + \mu \mathcal{E}_x x_{out} y_{in}^* \\ h_{yx} &= h_{yx} + \mu \mathcal{E}_y y_{out} x_{in}^* \\ h_{yy} &= h_{yy} + \mu \mathcal{E}_y y_{out} y_{in}^* \end{aligned} \quad (10)$$

Em (10),  $\mathcal{E}_x = 1 - |x_{out}|^2$ ,  $\mathcal{E}_y = 1 - |y_{out}|^2$  e  $\mu$  são os parâmetros de convergência. Estes devem ser escolhidos corretamente de modo a que o sistema não demore muito tempo a convergir e por outro lado não se instabilize facilmente. Contudo, este método não evita que as duas saídas do equalizador convirjam para a mesma polarização, ou mesmo que a primeira saída do

equalizador corresponda à polarização  $x$  e a segunda à  $y$ . Segundo Kazuro Kikuchi em [20], é possível garantir que as duas saídas são ortogonais, utilizando para a atualização dos coeficientes dos filtros a simetria da matriz de Jones (11).

$$\begin{aligned} h_{xx} &= h_{xx} + \mu \mathcal{E}_x x_{out} x_{in}^* \\ h_{xy} &= h_{xy} + \mu \mathcal{E}_x x_{out} y_{in}^* \\ h_{yx} &= -h_{xy}^* \\ h_{yy} &= h_{xx}^* \end{aligned} \quad (11)$$

No projeto do equalizador, deve-se ter em atenção o número mínimo de coeficientes do filtro. Segundo Bernhard Spinnler em [16] é dado por  $N_{PMD} = \left\lceil \frac{\tau_{DGD}}{T} \right\rceil$ , onde  $\tau_{DGD}$  representa o atraso médio entre as duas polarizações. Este pode ser calculado como sendo o produto da valor médio do parâmetro da PMD,  $ps/\sqrt{km}$ , e o comprimento da fibra.

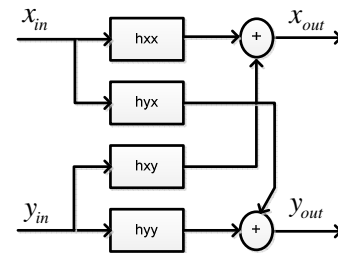


Fig. 5 - Equalizador MIMO.

### C - Recuperação da Fase da Portadora

Do batimento entre o sinal e o oscilador local resulta uma diferença de fase e frequência. Estes desfasamentos continuam a ser um grave problema para a eficiência dos sistemas coerentes. Para proceder à sua compensação, um elevado número de métodos foram propostos [13, 19, 21-23], em que os mais frequentes são baseados em malhas sem realimentação devido à sua relativa facilidade de implementação para altos ritmos de transmissão e estabilidade. O método mais abordado é o Viterbi & Viterbi que recorre a uma não-linearidade de quarta ordem para eliminar o formato de modulação (12), no caso do 4QAM.

$$\phi[k] = \frac{1}{2N+1} \sum_{m=-N}^N \arg\{x_m^4[k+n]\} \quad (12)$$

$\phi[k]$  representa a fase média estimada para um conjunto de  $2N+1$  amostras. Estimado este valor, é possível compensar o sinal desfazendo-o do valor simétrico como ilustra a figura 6. Uma vez que este algoritmo mede para cada bloco de amostras o erro de fase absoluto, não apresenta grande tolerância a rotações de fase. Na verdade

este permite apenas uma rotação de  $\pm \frac{\pi}{4}$  em torno do ponto ideal [24]. Este valor justifica-se facilmente, pois sendo o algoritmo cego, não tem capacidade de distinguir as transições entre quadrantes, isto é, entre zonas de decisão. Uma boa adaptação ao algoritmo de Viterbi é apresentada na figura 7. Apesar de ser utilizada uma malha de realimentação, o circuito, ao realimentar a fase cumulativa, torna-se mais robusto ao ruído de fase e consegue seguir melhor a deslocação da constelação. Considerando a paralelização do circuito, apenas existe uma linha de realimentação que corresponde à média das fases estimadas. Esta abordagem, apesar de apresentar um elevado desempenho em ambientes de simulação, é frequentemente evitada, visto que o uso de uma malha de realimentação pode limitar o desempenho e a estabilidade do compensador em implementações reais, devido ao atraso introduzido [25].

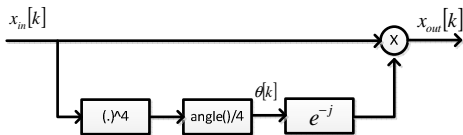


Fig. 6 - Implementação do algoritmo Viterbi&Viterbi.

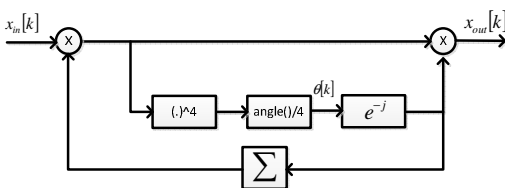


Fig. 7 - Adaptação ao circuito Viterbi&Viterbi.

V. SIMULAÇÃO

A nova versão do simulador, OSIP 2012, foi utilizada para estudar um sistema ótico coerente com igualação. O sistema a simular é de dupla polarização com formato de modulação de amplitude em quadratura (DP-QAM), cujo emissor e recetor se encontram nas figuras 8 e 9, respetivamente. A sequência binária tem um ritmo de 100Gbit/s e um comprimento de  $2^{16}$  bits. No conversor analógico digital ADC são retiradas duas amostras por símbolo, portanto uma frequência de amostragem de 100G amostras por segundo. O sinal propaga-se numa fibra ótica monomodo standard (SMF) com um comprimento de 1000km, apresentando uma dispersão total de 17ns/nm e um atraso de grupo diferencial (DGD) de 3.16ps [9]. As rotações de polarização são geradas aleatoriamente com o intuito de simular o PMD. É adicionado ruído óptico à entrada do receptor, para que a relação sinal ruído ótico (OSNR) à entrada deste seja de 5dB. Os lasers do emissor e do recetor apresentam uma largura espectral de 100kHz. Os filtros elétricos do emissor e do recetor são de Bessel com uma largura de banda de 45GHz. O receptor apresenta à sua entrada um filtro ótico Gaussiano de 3ª ordem com largura de banda de 95GHz.

Os conversores ADC e DAC possuem uma resolução de 8bits, enquanto que os amplificadores no emissor apresentam um ganho de 13.98dB. Após a amostragem, os sinais provenientes das duas polarizações são processados por um DSP, que implementa os algoritmos de igualação, e as sequências decodificadas são depois comparadas com as do emissor em cada polarização, medindo os erros ocorridos. As constelações dos sinais obtidos para as polarizações *x* e *y* encontram-se na figura 11. Para o caso de estudo, a dispersão provoca um alargamento temporal no impulso de 13.6ns, que é muito elevado comparado com o período de símbolo (40ps). Aliando também o efeito da PMD, do ruído de fase e do ruído quântico, é natural que o sinal recebido esteja completamente degradado, como ilustra na figura 11-(a). Após a compensação da dispersão, a constelação continua muito ruidosa, figura 11-(b), como seria de prever, pois considerando apenas o efeito da PMD é de esperar obter 16 pontos na constelação, resultado das combinações com a matriz de Jones, estando estes sujeitos ao ruído. Aplicando agora o algoritmo de compensação da PMD já se consegue obter uma constelação mais nítida, figura 11-(c). Na verdade, o que se obtém é uma constelação circular de módulo unitário sujeita ao ruído quântico e de fase. Já seria de calcular, uma vez que o algoritmo CMA converge tendo em consideração o módulo do sinal, forçando-o a ser unitário. Aplicando agora o algoritmo de compensação da fase do sinal obtém-se a constelação correta do sinal nas duas polarizações, figura 11-(d).

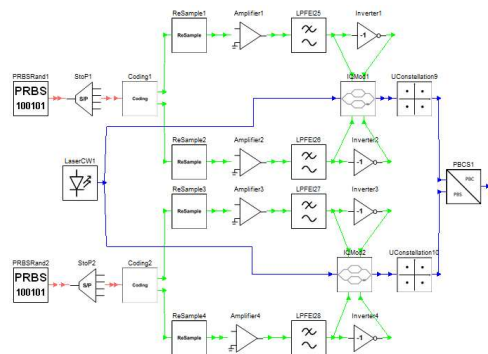


Fig. 8 - Emissor DP-4QAM.

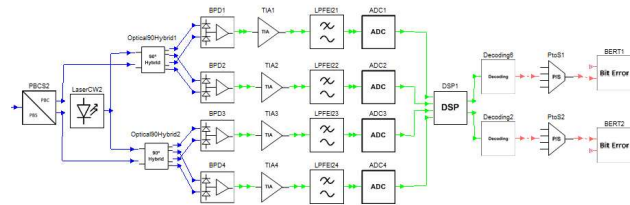


Fig. 9 - Recetor DP-4QAM com DSP.



Fig. 10 - Simulação do link: 1000km de fibra com dispersão, PMD de 1ª ordem e OSNR de 5dB.

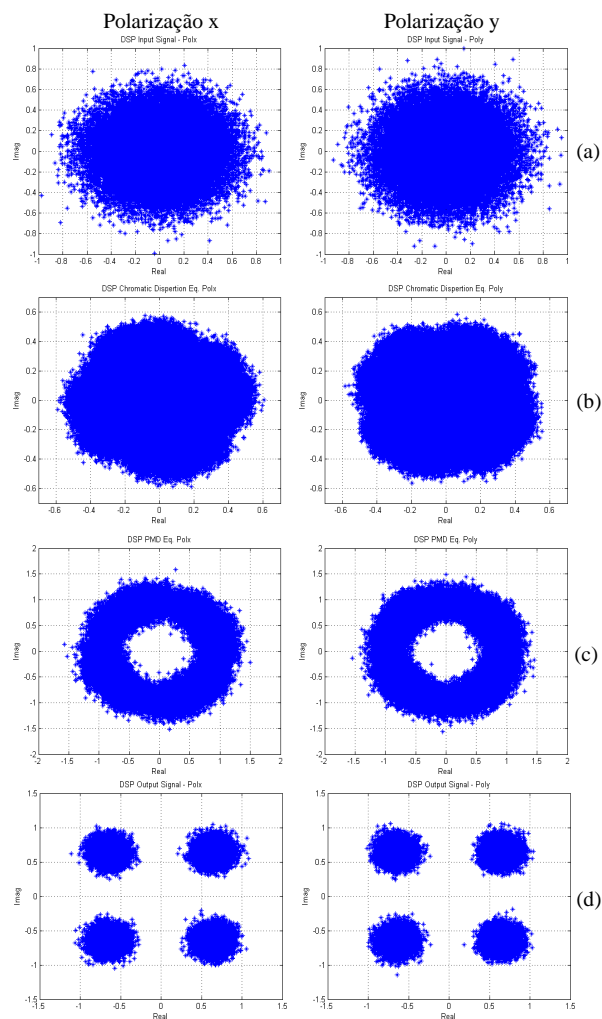


Fig. 11 - Resultados da simulação para a polarização x e y: (a) Sinal recebido no DSP; (b) Sinal após a compensação da dispersão cromática; (c) Sinal após a compensação da PMD; (d) Sinal após a correção de fase.

## VI. CONCLUSÕES

Neste artigo apresentaram-se as novas funcionalidades do simulador OSIP e demonstraram-se algumas das suas potencialidades, com a simulação de um sistema ótico coerente de última geração, com processamento digital de sinal. Os diferentes algoritmos para a compensação das dispersões na fibra ótica (DC, PMD) e da recuperação da fase da portadora, tendo em conta os ruídos de fase dos lasers, foram testados num cenário com 1000km de fibra SMF.

As novas funcionalidades e modelos implementados no OSIP 2012 irão contribuir para o ensino e investigação dos presentes e próximos sistemas óticos coerentes. Pode realçar-se o estudo de novos algoritmos de compensação de efeitos lineares e não-lineares e de sistemas com fibras óticas multimodo.

## REFERÊNCIAS

- [1] G. Li, "Recent advances in coherent optical communication," *Adv. Opt. Photon.*, vol. 1, pp. 279-307, 2009.
- [2] M. Seimetz, *High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission*: Springer, 2009.
- [3] VPIsystems. (2012). <http://www.vpi-photonics.com/>.
- [4] D. Gurkan, et al., "Remote Laboratories for Optical Circuits," *Education, IEEE Transactions on*, vol. 51, pp. 53-60, 2008.
- [5] A. J. Sakena, et al., "Optical amplifier number and placement in the superPON architecture," *The 6th International Conference on*, 2004, pp. 186-191.
- [6] OSIP, "<http://www.av.it.pt/osip/>," 2012.
- [7] T. MathWorks. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
- [8] R. S. Ribeiro, "Simulação, Análise e Optimização de Sistemas FSK Óticos," Ph.D thesis, Universidade de Aveiro, 1996.
- [9] E. Ip, et al., "Coherent detection in optical fiber systems," *Opt. Express*, vol. 16, pp. 753-791, 2008.
- [10] G. Charlet, "Coherent detection associated with digital signal processing for fiber optics communication," *Comptes Rendus Physique*, vol. 9, pp. 1012-1030, 2008.
- [11] S. J. Savory, "Digital filters for coherent optical receivers," *Opt. Express*, vol. 16, pp. 804-817, 2008.
- [12] T. Xu, et al., "Chromatic dispersion compensation in coherent transmission system using digital filters," *Opt. Express*, vol. 18, pp. 16243-16257, 2010.
- [13] M. Kuschnerov, et al., "DSP for Coherent Single-Carrier Receivers," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 27, pp. 3614-3622, 2009.
- [14] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*: Wiley-Interscience, 2002.
- [15] R. Kudo, et al., "Coherent Optical Single Carrier Transmission Using Overlap Frequency Domain Equalization for Long-Haul Optical Systems," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 27, pp. 3721-3728, 2009.
- [16] B. Spinnler, "Equalizer Design and Complexity for Digital Coherent Receivers," *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 16, pp. 1180-1192, 2010.
- [17] T. Merker, et al., "Comparison of PMD-compensation techniques at 10 Gbit/s using an optical first-order compensator and electrical transversal filter," *Optics Communications*, vol. 182, pp. 135-141, 2000.
- [18] R. Andres Soriano, et al., "Chromatic Dispersion Estimation in Digital Coherent Receivers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 29, pp. 1627-1637, 2011.
- [19] S. J. Savory, "Digital Coherent Optical Receivers: Algorithms and Subsystems," *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 16, pp. 1164-1179, 2010.
- [20] K. Kikuchi, "Polarization-demultiplexing algorithm in the digital coherent receiver," in *IEEE/LEOS Summer Topical Meetings, 2008 Digest of the*, 2008, pp. 101-102.
- [21] T. Pfau, et al., "Hardware-Efficient Coherent Digital Receiver Concept With Feedforward Carrier Recovery for M-QAM Constellations," *J. Lightwave Technol.*, vol. 27, pp. 989-999, 2009.
- [22] H. Sun and K.-T. Wu, "Techniques in Carrier Recovery for Optical Coherent Systems," 2012, p. OTh4C.3.
- [23] N. Stojanovic, et al., "Robust Carrier Recovery in Polarization Division Multiplexed Receivers," 2012, p. OTu2G.3.
- [24] G. De Jonghe and M. Moeneclaey, "Optimal averaging filter length of the Viterbi and Viterbi carrier synchronizer for a given frequency offset," in *Global Telecommunications Conference, 1994. GLOBECOM '94. Communications: The Global Bridge., IEEE*, 1994, pp. 1363-1368 vol.3.
- [25] C. Xie, et al., "Adaptive Carrier Phase Estimation in Coherent Systems," 2012, p. OTu2G.5.