

# Transmissão de Sinais Ópticos em Banda Lateral Única, com Igualação no Domínio Eléctrico Utilizando o Critério dos Zeros Forçados, para Sistemas com um Ritmo de Transmissão de 10 Gbit/s

Edgardo Costa, António Pinho, Paulo Monteiro, Rui Ribeiro, J. Ferreira da Rocha, Tiago Maia

**Resumo** – É apresentado um sistema de transmissão óptico em banda lateral única (SSB) a 10 Gbit/s, que juntamente com o critério de igualação dos zeros forçados, permite a compensação da dispersão no domínio eléctrico. A transmissão de sinais ópticos SSB permite a duplicação das distâncias de transmissão. É demonstrado por simulação do sistema, que para um valor de BER de  $10^{-9}$ , utilizando o método de igualação anterior, se conseguem atingir distâncias de transmissão até 215 km.

**Abstract** - In this article is investigated an optical single sideband transmission system at 10 Gbit/s with electrical equalization, using the zero forcing criteria, to compensate the chromatic dispersion. The optical transmission of single sideband signals increases the transmission distances relative to the transmission in double sideband (DSB) form. Simulation results also showed that using this electrical equalization it is possible to achieve transmission distances up to 215 km, for a BER of  $10^{-9}$ .

## I. INTRODUÇÃO

A dispersão cromática na fibra é um fenómeno que limita significativamente as distâncias de transmissão em sistemas com elevado ritmo de transmissão, como é o caso de sistemas em que a transmissão se efectua a 10 Gbit/s. Isto deve-se ao facto da dispersão cromática provocar um aumento da interferência entre símbolos (IES) no sinal detectado. Torna-se então importante o desenvolvimento de técnicas que permitam compensar os efeitos da dispersão cromática na fibra.

Neste contexto, assumem primordial importância os recentes métodos de transmissão de sinais ópticos em banda lateral única (SSB-“*Single Sideband*”) para sistemas em banda base a operar a 10 Gbit/s [1].

A transmissão de sinais ópticos em banda lateral única apresenta vantagens em relação à transmissão em banda lateral dupla (DSB-“*Double Sideband*”). Para o caso de um sinal no formato SSB, a largura de banda óptica é aproximadamente metade em comparação com um sinal DSB, reduzindo-se assim significativamente os efeitos indesejáveis da dispersão cromática e possibilitando o aumento considerável do número de canais de transmissão. A detecção directa do sinal SSB presença da portadora, resulta na detecção auto-homodina. O sinal eléctrico detectado apresenta neste caso preservação da informação de fase, o que permite a sua igualação no domínio eléctrico.

A igualação da dispersão pode ser efectuada por uma linha microfita [1], que apresenta uma resposta em frequência aproximadamente inversa da resposta em frequência da fibra. No entanto, para distâncias de fibra consideráveis este tipo de igualação é bastante limitativo, uma vez que existe um comprimento de linha microfita óptimo para cada comprimento de fibra. Para além disso, para grandes comprimentos de fibra podem ser necessárias linhas microfita com tamanhos consideráveis, o que provoca uma atenuação significativa e dependente da frequência, causando distorção do sinal.

Neste artigo é apresentada uma técnica que consiste na criação de sinais ópticos em banda lateral única (SSB), que juntamente com uma posterior igualação eléctrica do sinal detectado, através do método dos zeros forçados, permite a compensação da dispersão introduzida pela fibra.

Na secção II é descrita em detalhe a teoria associada à criação de sinais ópticos de banda lateral única (SSB) e a teoria da igualação pelo método dos zeros forçados. Na secção III são apresentados e discutidos os resultados obtidos por simulação de um sistema óptico a 10 Gbit/s. São apresentados os resultados relativos à transmissão de sinais SSB, os resultados da igualação eléctrica do sinal através do critério dos zeros forçados e é feita uma comparação entre este tipo de igualação e a igualação teórica. Por fim, na secção IV são apresentadas as conclusões finais do trabalho realizado.

## II. TEORIA

### A. Transmissão de sinais em banda lateral única

No método utilizado para a criação de sinais ópticos em banda lateral única (SSB), a informação do sinal e a sua transformada de Hilbert são aplicadas a um modulador Mach-Zehnder (MZ), onde as portadoras ópticas sofrem um desfasamento relativo de  $\pi/2$  radianos no ponto onde são adicionadas.

Para criar um sinal óptico SSB segundo o método descrito anteriormente, utiliza-se a configuração representada na figura 1. A configuração utiliza um modulador Mach-Zehnder (MZ) e um modulador de fase (PM).

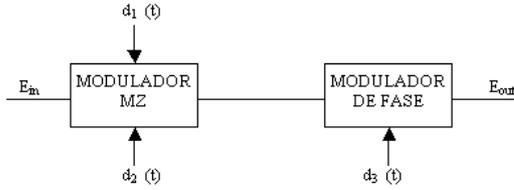


Fig. 1 – Configuração utilizada para a geração de sinais ópticos em banda lateral única (SSB)

O campo eléctrico à saída do modulador MZ pode ser representado pela expressão (1), onde  $V_\pi$  representa, a tensão de inversão total de fase no modulador,  $d_1(t)$  e  $d_2(t)$  representam os sinais eléctricos de modulação de cada ramo do modulador e  $E_{in}(t)$  representa o campo eléctrico à entrada do modulador, que é dado por  $\exp(j\omega_0 t)$ , onde  $\omega_0$  representa a frequência da portadora óptica.

$$E_{out}(t) = \frac{E_{in}(t)}{2} \left[ \exp\left(j\pi \frac{d_1(t)}{V_\pi}\right) + \exp\left(j\pi \frac{d_2(t)}{V_\pi}\right) \right] \quad (1)$$

O campo eléctrico à saída do modulador de fase é dado pela expressão (2), onde  $d_3(t)$  representa o sinal eléctrico de modulação do PM.

$$E_{out}(t) = \frac{E_{out_{MZ}}(t)}{2} \left[ \exp\left(j\pi \frac{d_3(t)}{V_\pi}\right) \right] \quad (2)$$

Os sinais eléctricos de modulação  $d_1(t)$ ,  $d_2(t)$  e  $d_3(t)$ , são dados pelas expressões (3), (4) e (5) respectivamente, onde  $x$  representa o factor de modulação,  $m(t)$  é uma versão do sinal de dados (NRZ) onde se removeu a componente contínua e que apresenta uma gama de valores compreendida entre  $-0.5V$  e  $0.5V$ . O sinal  $\hat{m}(t)$  é a transformada de Hilbert de  $m(t)$ .

$$d_1(t) = xV_\pi m(t) - \frac{V_\pi}{4} \quad (3)$$

$$d_2(t) = -xV_\pi m(t) + \frac{V_\pi}{4} \quad (4)$$

$$d_3(t) = xV_\pi \hat{m}(t) \quad (5)$$

A implementação experimental de uma aproximação da transformada de Hilbert, por forma a ser criado o sinal  $\hat{m}(t)$  a partir do sinal de dados  $m(t)$ , é feita utilizando o filtro transversal (filtro FIR) com quatro atrasos apresentado em [1].

### B. Igualação utilizando o critério dos zeros forçados

Com a igualação utilizando o critério dos zeros forçados (“Zero-Forcing Equalizer”) [2], pretendemos determinar o filtro com função de transferência  $H_r(f)$  que para impulsos  $g(t)$  na entrada origine impulsos  $h_o(t)$  na saída com interferência entre símbolos (IES) nula, e que para esta condição minimize a variância do ruído nos instantes de amostragem. Para tal, é necessário que as caudas precursoras e posteriores do impulso elementar à saída do filtro  $H_r(f)$  se anulem nos instantes afastados de múltiplos de  $T$  do instante de amostragem. Se considerarmos o instante de amostragem em  $t=0$ , o filtro igualador  $H_r(f)$  terá de verificar as seguintes condições:

$$\begin{cases} h_0(0) = 1 \text{ (ou outra constante diferente de 0)} \\ h_0(KT) = 0, \quad K = -N, \dots, N \wedge K \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

O filtro óptimo  $H_r(f)$  que garante as condições descritas em (6) é dado pela seguinte expressão.

$$H_r(f) = \frac{G^*(f)}{S_n(f)} \cdot \sum_{k=-N}^N \lambda_k \cdot e^{-j.2\pi.k.T} \quad (7)$$

Na expressão anterior  $S_n(f)$  representa a densidade espectral de potência (DEP) do impulso  $g(t)$  recebido. O igualador não é mais que a cascata de um filtro adaptado com função de transferência  $G^*(f)/S_n(f)$ , com um filtro transversal (filtro FIR) com  $2N+1$  coeficientes e  $2N$  atrasos. O filtro adaptado tem por objectivo maximizar a relação sinal ruído no instante de decisão. Este filtro não anula a IES e pode mesmo aumentá-la, por isso utiliza-se um filtro FIR de comprimento  $2N+1$  para remover a IES causada por  $2N$  símbolos ( $N$  símbolos anteriores e  $N$  símbolos posteriores). O número de coeficientes do filtro é igual ao número de condições que se pretende impor.

O valor dos coeficientes  $\lambda_k$  do filtro transversal são calculados resolvendo o sistema de equações lineares que em termos matriciais é dado por:

$$L^T = U^T \cdot M^{-1} \quad (8)$$

$$L = \begin{bmatrix} \lambda_{-N} \\ \vdots \\ \lambda_0 \\ \vdots \\ \lambda_N \end{bmatrix} \text{ e } U = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} m(0) & m(T) & \dots & m((2N-1)T) & m(2NT) \\ m(-T) & m(0) & \dots & m((2N-2)T) & m((2N-1)T) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ m(-(2N-1)T) & m(-(2N-2)T) & \dots & m(0) & m(T) \\ m(-2NT) & m(-(2N-1)T) & \dots & m(-T) & m(0) \end{bmatrix}$$

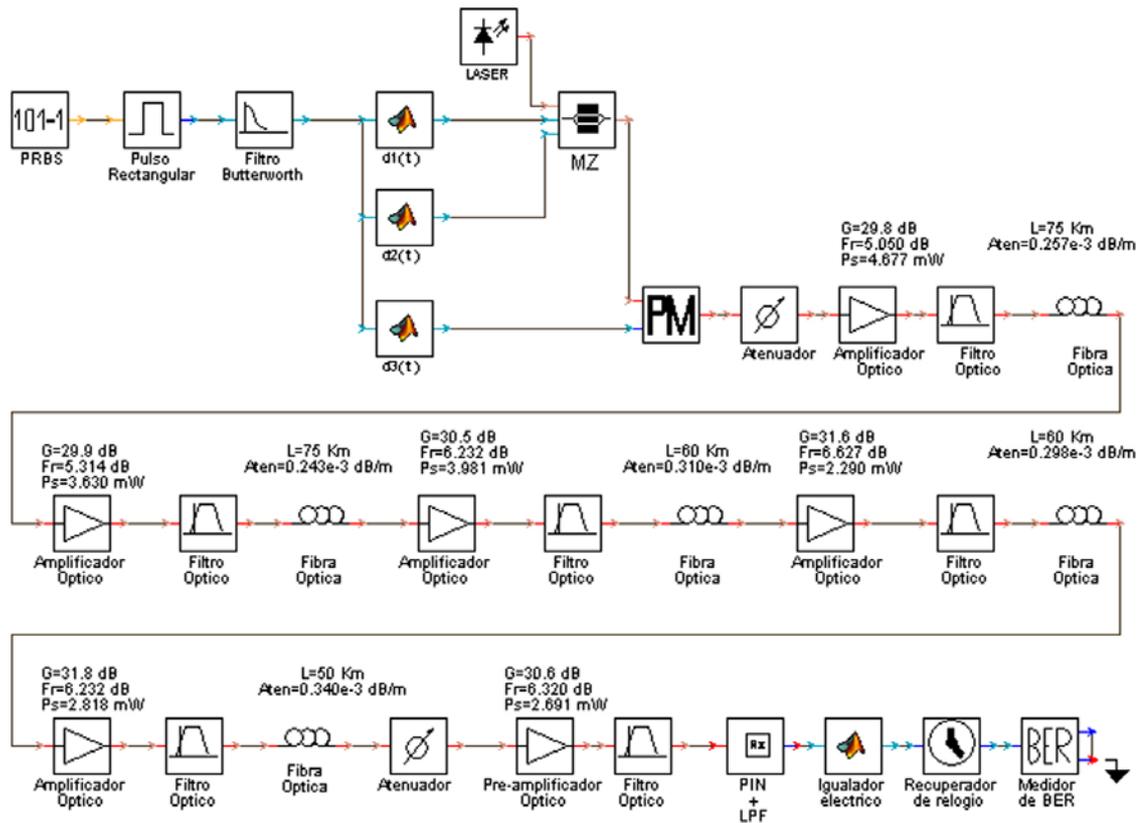


Fig. 2 – Esquema utilizado na simulação do sistema óptico a 10 Gbit/s.

### III. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Para se proceder ao teste por simulação do sistema de transmissão óptico em banda lateral única a 10 Gbit/s, com igualação da dispersão no domínio eléctrico utilizando o critério dos zeros forçados, utilizou-se o esquema representado na figura 2. O sistema óptico foi implementado no simulador VPItransmissionMaker™ [3].

O emissor SSB é composto por um gerador de sequências pseudo-aleatórias, seguido de um formador de impulsos eléctricos, para se efectuar a criação do sinal de dados  $m(t)$  com formato NRZ. Seguidamente faz-se passar o sinal por um filtro passa-baixo Butterworth de 3ª ordem com frequência de corte a 3 dB igual a 6.5 GHz. Usa-se um laser como fonte óptica, com uma frequência central de 193.55 THz, o que equivale a 1550 nm em termos de comprimento de onda e com uma largura espectral de 150 KHz e amplitude 1 mW. A portadora óptica é modulada pelo sinal de informação a transmitir através de um modulador de amplitude MZ e posteriormente por um modulador de fase PM. O sinal à saída do modulador de fase PM vai passar por um atenuador óptico para se conseguir igualar a potência óptica média do sinal ao valor referido em [1]. O sistema óptico tem 320 km de fibra e é constituído por 5 troços de fibra óptica com amplificação, de forma a podermos compensar as perdas da fibra. Após cada amplificador introduziu-se um filtro óptico passa-banda que tem como

objectivo filtrar parte do ruído de emissão espontânea introduzido pelos amplificadores. Trata-se de um filtro passa-banda trapezoidal com frequência central igual a 193.55 THz, largura de banda de passagem igual a 20 GHz, largura de banda entre a frequência de corte superior e a frequência de corte inferior de 40 GHz e atenuação de 20 dB quer a uma quer a outra frequência. As características dos amplificadores utilizados, no que diz respeito ao factor de ruído, ganho e potência de saturação são apresentadas na figura 2, junto ao respectivo amplificador. A fibra utilizada é denominada de NLS (*Nonlinear Dispersive Fiber*) e apresenta uma dispersão ( $D_\lambda$ ) de  $17 \cdot 10^{-6} \text{ s/m}^2$ , dispersão de 2ª ordem ( $S_\lambda = \partial D_\lambda / \partial \lambda$ ) de  $0.08 \cdot 10^{-3} \text{ s/m}^3$ , índice de refração não linear de  $2,6 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$  e considerou-se nulo o efeito de Raman. A atenuação de cada troço de fibra bem como o seu comprimento encontram-se representadas mais uma vez na figura 2. Por fim, o receptor utilizado no sistema, consiste num fotodiodo PIN (*Positive-Intrinsic-Negative*) e num filtro passa-baixo de Bessel de 3ª ordem com frequência de corte a 3 dB igual a 6.5 GHz, que tem por objectivo simular a largura de banda limitada de um PIN experimental. O fotodiodo PIN utilizado é caracterizado por uma responsividade  $R=0.7$

A/W, corrente de escuridão de 1 nA, ruído térmico de  $12 \cdot 10^{-12} \text{ A}/\sqrt{\text{Hz}}$ , tendo-se também incluído ruído quântico gerado na detecção óptica do sinal.

A. Transmissão de sinais em banda lateral única

Com o auxílio de um analisador de espectros óptico, colocado à saída do modulador de fase obteve-se o espectro óptico do sinal SSB gerado, que é apresentado na figura 3 a). Mostra-se também na figura 3 b), o espectro óptico de um sinal DSB. Para a obtenção do sinal DSB procedeu-se à alteração da saída do bloco responsável pela criação do sinal eléctrico de modulação de fase  $d_3(t)$ , de forma a que este sinal fosse nulo. Desta forma o modulador de fase fica inoperante e o sinal modulado à saída do modulador MZ é o sinal DSB pretendido. É de referir que os resultados foram obtidos para um factor de modulação  $x=0.2$  para o caso do sinal SSB e para um factor de modulação  $x=0.5$  no caso do sinal DSB. Para os dois casos o valor de  $V_\pi$  utilizado é de 1 V. O valor do atraso T do filtro de Hilbert, foi considerado como sendo igual a 37.5 ps.

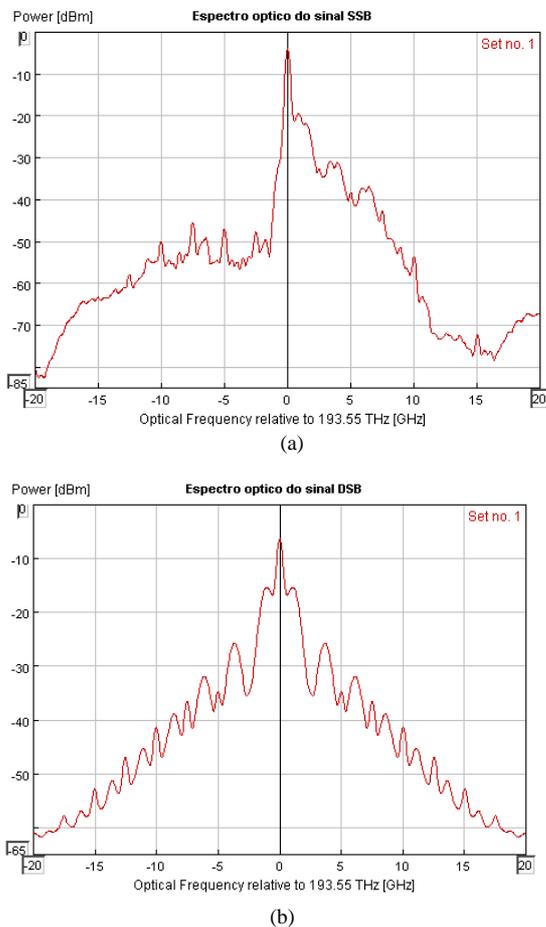


Fig. 3 – Espectro óptico (a) do sinal SSB e (b) do sinal DSB para um sistema a 10 Gbit/s.

Pela análise da figura 3 a) conclui-se que existe uma redução de cerca de 30 dB do espectro, na gama de frequências inferiores à frequência central.

Na figura 4 está representada a sensibilidade do receptor em função do comprimento da fibra óptica, para os casos do sinal DSB e do sinal SSB sem igualação. Nos

dois casos o valor da sensibilidade foi medido de modo a garantir-se um valor de BER (“Bit Error Rate”) de  $10^{-9}$ .

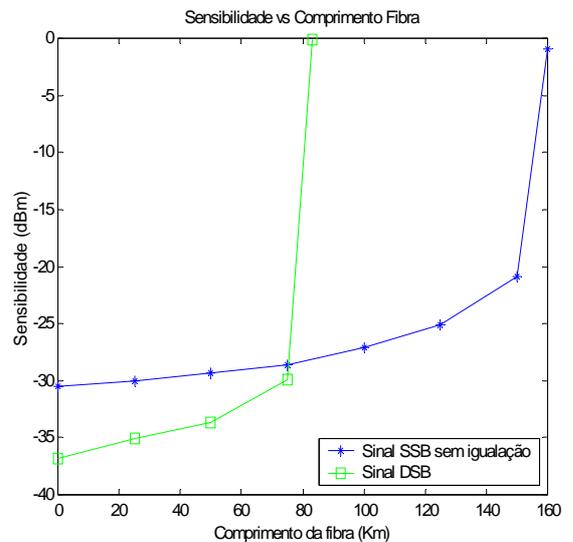


Fig. 4 – Sensibilidade do receptor em função do comprimento da fibra, para uma BER de  $10^{-9}$ , para o caso do sinal DSB e do sinal SSB sem igualação, para um sistema a 10 Gbit/s.

Para comprimentos de fibra relativamente pequenos, os valores da sensibilidade para o caso do sinal DSB são superiores aos valores da sensibilidade para o caso do sinal SSB sem igualação. Isto deve-se ao facto do factor de modulação ser superior no caso do sinal DSB, o que provoca um aumento da potência média à saída do modulador Mach-Zehnder. Garantindo um valor de BER de  $10^{-9}$  consegue-se transmitir eficientemente o sinal DSB ao longo de 80 km de fibra e o sinal SSB sem igualação ao longo de 160 km de fibra. Conclui-se, que com este método de transmissão de sinais ópticos em banda lateral única, as distâncias de transmissão são aumentadas para o dobro. Isto deve-se ao facto do sinal SSB apresentar uma largura de banda óptica que é aproximadamente metade da largura de banda óptica do sinal DSB.

B. Igualação utilizando o critério dos zeros forçados

Para se proceder à igualação no domínio eléctrico do sinal SSB utiliza-se o critério dos zeros forçados. Para tal, torna-se necessário calcular os coeficientes do filtro transversal de 4ª ordem (5 coeficientes) que é utilizado. Pretende-se o anulamento do impulso nos dois instantes de amostragem anteriores (-T e -2T) e nos dois instantes de amostragem posteriores (+T e +2T), em relação ao instante de amostragem de referência para o qual o impulso apresenta o seu valor máximo. O filtro possui atrasos de 1 período de bit  $T=100$  ps. Na figura 5 a) e 5 b) estão representados o impulso inicial sem igualação e o impulso final com igualação obtido à saída do filtro transversal igualador, para 150 km de fibra.

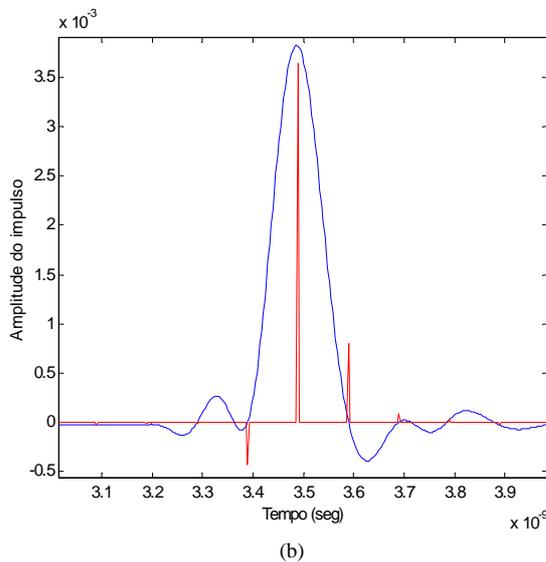
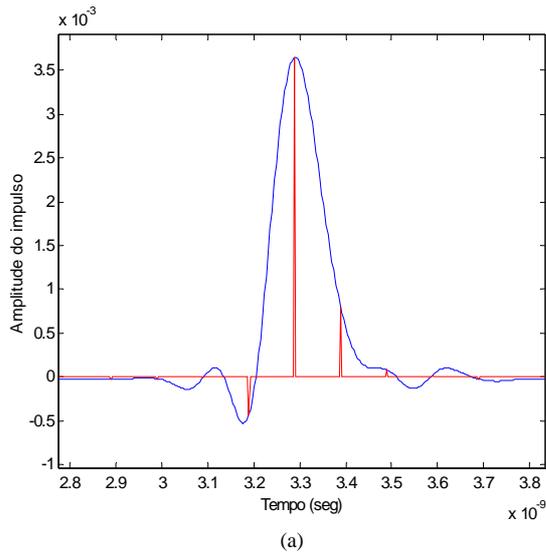


Fig. 5 – Impulso (a) inicial, antes da igualação e (b) final, após a igualação, para 150 km de fibra.

O impulso anula-se nos dois instantes de amostragem anteriores e posteriores ao instante de amostragem para o qual o impulso apresenta o seu valor máximo. Para comprimentos de fibra superiores verifica-se um aumento da distorção do impulso e um alargamento do mesmo, o que provoca um aumento da amplitude das caudas precursoras e posteriores do impulso final igualado.

Tendo em consideração que os coeficientes do filtro transversal igualador foram calculados para diversos comprimentos de fibra procedeu-se ao estudo do desempenho do igualador ZF. Na figura 6 está representada a sensibilidade do receptor em função do comprimento da fibra óptica, para os casos do sinal DSB, do sinal SSB sem igualação e do sinal SSB com igualação utilizando o filtro transversal de 4ª ordem.

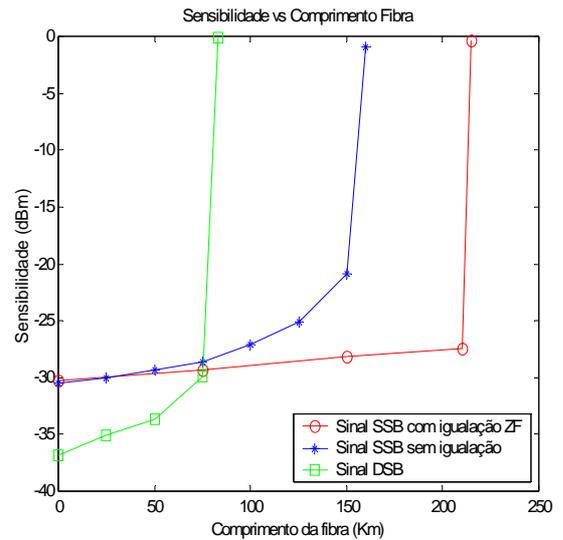


Fig. 6 – Sensibilidade do receptor em função do comprimento da fibra, para uma BER de  $10^{-9}$ , para o caso do sinal DSB, do sinal SSB sem igualação e do sinal SSB com igualação pelo método dos zeros forçados, para um sistema a 10 Gbit/s.

Com este método de igualação conseguem-se distâncias de transmissão de 215 km para um valor de BER de  $10^{-9}$ . Se compararmos esta distância com a obtida sem igualação do sinal SSB, verifica-se que se consegue um acréscimo de cerca de 55 km. Na figura 7 representam-se os diagramas de olho do sinal SSB antes e depois da igualação, para 150 km e 210 km de fibra. Verifica-se que para estas distâncias de fibra a utilização do igualador é fundamental, conseguindo-se aumentar consideravelmente a abertura do olho.

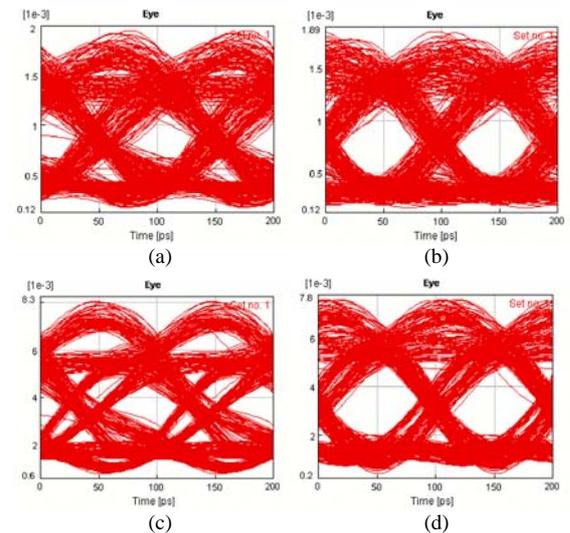


Fig. 7 – Diagramas de olho do sinal SSB (a) antes da igualação e (b) depois da igualação para 150 km de fibra e (c) antes da igualação e (d) depois da igualação para 210 km de fibra.

### C. Igualação teórica versus igualação pelo critério dos zeros forçados

Nesta secção realiza-se um estudo comparativo entre a igualação teórica e a igualação utilizando o critério dos zeros forçados.

Fazendo a aproximação para pequenos sinais, a igualação eléctrica da dispersão em termos teóricos, pode ser efectuada utilizando um modelo equivalente dado pela função de transferência representada pela expressão (9) [1,4], onde  $D$  é o coeficiente de dispersão,  $L$  é o comprimento da fibra,  $\lambda$  é o comprimento de onda de trabalho,  $f$  é a frequência equivalente passa-baixo e  $c$  a velocidade da luz.

$$\begin{cases} H(f) = \exp\left(-\frac{j\pi DL\lambda^2 f^2}{c}\right); & f \geq 0 \\ H(f) = \exp\left(\frac{j\pi DL\lambda^2 f^2}{c}\right); & f < 0 \end{cases} \quad (9)$$

Na figura 8 representa-se a sensibilidade do receptor em função do comprimento da fibra, para o caso da igualação teórica utilizando o filtro com função de transferência representada pela expressão (9). Apresentam-se também os valores da sensibilidade para o caso da igualação com filtro transversal de 4ª ordem utilizando o critério dos zeros forçados e para o caso em que não se efectua qualquer igualação do sinal.

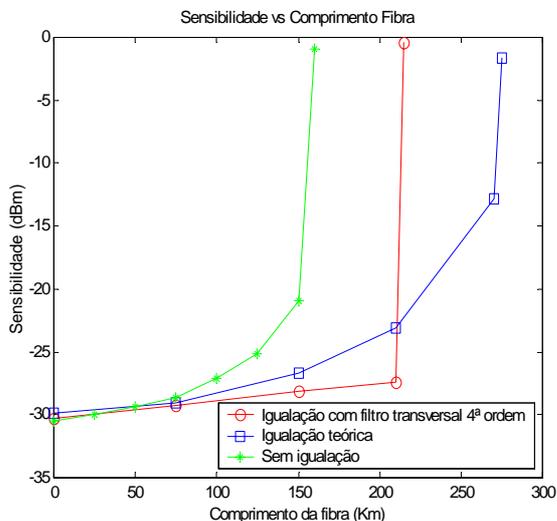


Fig. 8 – Sensibilidade do receptor em função do comprimento da fibra, para uma BER de  $10^{-9}$ , do sinal SSB sem igualação, do sinal SSB com igualação pelo método dos zeros forçados e do sinal SSB com igualação teórica, para um sistema a 10 Gbit/s.

Utilizando o igualador teórico, garante-se a transmissão com um valor de BER igual a  $10^{-9}$  até cerca de 275 km. Isto representa um acréscimo de cerca de 60 km comparativamente ao caso em que se utiliza o filtro transversal de 4ª ordem. Conclui-se que o filtro transversal igualador de 4ª ordem consegue uma melhoria significativa no desempenho do sistema. No entanto, não

se conseguem atingir os resultados obtidos com o filtro teórico.

### V. CONCLUSÕES

Verifica-se que o sinal em banda lateral única (SSB) consegue ser razoavelmente aproximado pelo filtro transversal FIR com 4 atrasos. Apesar da banda lateral não ser completamente eliminada, consegue-se uma redução de cerca de 30 dB do espectro das frequências à esquerda da frequência central, o que é bastante significativo.

No que diz respeito ao desempenho do emissor SSB, verifica-se que as distâncias de transmissão aumentam aproximadamente para o dobro, em comparação com o caso da emissão de sinais DSB. O aumento para o dobro da distância de transmissão conseguida com o sinal SSB, deve-se ao facto do sinal SSB apresentar uma largura de banda óptica que é aproximadamente metade da largura de banda óptica do sinal DSB.

Com a igualação utilizando o critério dos zeros forçados, conseguem-se distâncias de transmissão de 215 km para um valor de BER de  $10^{-9}$ . Se compararmos esta distância com a obtida sem igualação do sinal SSB, verifica-se que se consegue um acréscimo de cerca de 55 km.

O filtro transversal igualador de 4ª ordem apresenta resultados muito melhores que o caso em que não se efectua igualação do sinal SSB. No entanto, não se conseguem atingir as distâncias de transmissão alcançadas com o igualador teórico.

Foi demonstrado que a utilização de um filtro transversal de 4ª ordem, para a realização da igualação pelo método dos zeros forçados, é uma boa escolha para a igualação do sinal em banda lateral única no domínio eléctrico.

### REFERÊNCIAS

- [1] Mike Seiben, Jan Conradi and David E. Dodds, "Optical Single Sideband Transmission at 10 Gb/s Using Only Electrical Dispersion Compensation", *J. of Lightwave Technology*, vol. 17, No 10, pp 1742-1749, Outubro 1999.
- [2] Atilio Gameiro, Apontamentos da Disciplina de Processamento de Sinal em Comunicações Digitais.
- [3] Manuais do Simulador VPItransmissionMaker™.
- [4] A. F. Elrefaie, R. E. Wagner, D. A. Atlas, and D. G. Daut, "Chromatic Dispersion Limitations in Coherent Lightwave Transmission Systems", *J. of Lightwave Technology*, vol. 6, pp. 704-709, May 1988.