



16, 17 e 18 de novembro de 2016.
Campina Grande, Paraíba, Brasil

ANÁLISE DO IMPACTO DAS PENALIDADES GERADAS NOS ELEMENTOS ÓPTICOS DE COMUTAÇÃO NO CENÁRIO DE REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

Matheus de Araújo Cavalcante¹, Helder Alves Pereira²

RESUMO

Para a implementação eficiente de caminhos ópticos (*lightpaths*), são necessários elementos de comutação óptica com alta seletividade em frequência. Entretanto, o formato imperfeito dos filtros ópticos podem degradar a qualidade do sinal óptico, e seu isolamento não ideal pode causar *crosstalk*. Neste trabalho, foram desenvolvidas modelagens analíticas para quantificar o efeito dessas duas penalidades físicas sobre a qualidade dos sinais ópticos transmitidos. Para quantificar a penalidade devido ao formato imperfeito do filtro óptico, utiliza-se da razão entre a potências dos sinais recebido e transmitidos na faixa de frequência de interesse. Por sua vez, o *crosstalk* foi quantificado utilizando resultados disponíveis na literatura para medir a qualidade de transmissão do sinal recebido. Os resultados obtidos mostram boa adequação das modelagens aos cenários de redes ópticas elásticas.

Palavras chave: Imperfeição do Filtro Óptico, Penalidades Físicas, Redes Ópticas Elásticas.

IMPACT ANALYSIS OF THE PHYSICAL IMPAIRMENTS GENERATED BY OPTICAL SWITCHING ELEMENTS ON A SCENARIO OF ELASTIC OPTICAL NETWORKS

ABSTRACT

In order to efficiently implement lightpaths over optical fibers, optical switching elements with high selectivity in frequency are required. However, their optical filters with imperfect shape might degrade the quality of transmission of the optical signal, and non-ideal isolation might cause crosstalk. On this research, we developed analytical modellings to measure the effect of such physical impairments over the quality of transmission. To measure the physical impairments due to the imperfect filter shape, the ratio between the power received and transmitted on the frequency band of interest was used. Crosstalk penalties were quantified through results available on the literature. The obtained results show that the analytical modellings agree well with scenarios of elastic optical networks.

Keywords: Elastic Optical Networks, Imperfect Optical Filter, Physical Impairments.

¹Aluno do Curso de Engenharia Elétrica, Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: matheus.cavalcante@ee.ufcg.edu.br

²Engenharia Elétrica, Professor Doutor, Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: helder.pereira@dee.ufcg.edu.br

INTRODUÇÃO

Para satisfazer as necessidades futuras da *Internet*, a transmissão óptica e a tecnologia de rede estão sendo direcionadas para tecnologias mais flexíveis, eficientes e escaláveis. Para tal, a multiplexação por divisão ortogonal de frequência (OFDM — *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) tem sido considerada como uma candidata promissora para a tecnologia óptica futura de transmissão de alta velocidade. OFDM é uma classe especial de esquemas de modulação multiportadora que transmite um conjunto de dados de alta velocidade dividindo a banda disponível em um número de canais ortogonais (subportadoras), onde cada um deles transmite dados em velocidades mais baixas. Comparado com sistemas por multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM — *Wavelength Division Multiplexing*), onde é necessário um espaçamento entre comprimentos de onda para eliminar interferências, OFDM permite que o espectro de subportadoras individuais se sobreponha devido à sua ortogonalidade.

Vantagens das transmissões em OFDM incluem sua propriedade de transmitir dados em alta velocidade dividindo a banda disponível em subportadoras de menor velocidade, aumentando a duração do símbolo e consequentemente diminuindo a interferência intersimbólica; alta eficiência espectral devido à sobreposição do espectro das subportadoras. Entretanto, OFDM é especialmente sensível a ruídos de frequência e de fase que afetem a ortogonalidade de suas subportadoras (ZHANG et al., 2013; JINNO; TAKARA; KOZICKI, 2009; JINNO et al., 2010).

Para uma melhor acomodação do tráfego, o espectro disponível na fibra óptica é discretizado em subportadoras denominadas de *slots*. Para a implementação eficiente de *lightpaths* sobre esses *slots*, são necessários equipamentos comutadores com alta seletividade em frequência, os SSS (*Spectrum Selective Switches*). Entretanto, esses elementos comutadores apresentam formatos imperfeitos do filtro óptico (POOLE et al., 2011), o que degrada a qualidade do sinal. De acordo com Poole et al. (2011), em uma rede óptica prática é necessário um *trade-off* entre o grau de flexibilidade em termos da granularidade da divisão dos *slots* e o grau de complexidade da rede. De fato, o cascadeamento de filtros afeta fortemente a degradação do sinal óptico, de forma que um espectro mais largo tem de ser dedicado à chamada para garantir a qualidade do sinal restringindo-o à região “plana” central do filtro e evitando sua zona de transição.

Outra penalidade física associada aos SSSs é o *crosstalk*, uma das mais importantes penalidades físicas, limitando o alcance dos *lightpaths* em redes ópticas (FILER; TIBULEAC, 2012). Ele pode ser classificado em heteródino, quando o sinal interferente advém de uma outra frequência, ou em *crosstalk* homodino, quando o sinal interferente advém da mesma frequência que o sinal principal. O *crosstalk* homodino é mais severo que o heteródino, pois a interferência ocorre completamente na largura de banda do sinal principal (GUPTA; CHATURVEDI; BHOMIA, 2011). O *crosstalk* homodino pode vir de diversas fontes, como por exemplo espalhamento *Rayleigh* ou *Brillouin* estimulado, subprodutos da mistura de quatro ondas (FWM — *Four Wave Mixing*), reflexão em descontinuidades da fibra, como emendas e conexões, e isolação imperfeita dos filtros usados para as atividades de *add* e *drop* dos comutadores ópticos (GUPTA; CHATURVEDI; BHOMIA, 2011; FILER; TIBULEAC, 2012). Um exemplo de configuração de rede que pode levar a *crosstalk* pode ser visto na Figura 1. O elemento SSS deveria fazer com que somente o Sinal 1 aparecesse na sua saída, mas devido à isolação insuficiente entre suas portas, resquícios do Sinal 2 também aparecerão na saída, causando *crosstalk*.

Figura 1: Exemplo de configuração de rede que leva a *crosstalk*.



Portanto, pode ser inferido que a imperfeição dos filtros ópticos e o *crosstalk* homodino reduzem a eficiência espectral da rede. Como essa eficiência é um dos objetivos dos operadores de rede, esse problema tem ganhado atenção na literatura especializada, justificando o escopo desta pesquisa.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A análise da imperfeição do filtro óptico tem sido alvo de bastantes estudos na literatura especializada. Os filtros ópticos introduzem maior atenuação próximo às bordas do espectro do sinal do que no seu centro. Dessa forma, quando o sinal óptico atravessa vários SSSs cascadeados, a largura de faixa do sinal óptico é diminuída, e filtros ópticos passa-faixa com uma seção central plana e quedas abruptas levam a larguras de faixa maiores que filtros com quedas mais suaves (HEISMANN, 2010). Surge, portanto, a questão de quantos SSSs o sinal óptico pode atravessar antes que eles se tornem distorcidos demais. Não existe uma resposta simples para responder essa questão. Como cita Heismann (2010), a dificuldade reside no fato que as penalidades físicas causadas pelo filtro óptico dependem não somente da largura espectral e formato das transmitâncias dos SSSs, mas também do esquema de modulação dos sinais transmitidos.

Giacoumidis, Tomkos e Tang (2011) abordaram o uso da modulação adaptativa para redução do impacto da concatenação dos filtros ópticos em sistemas ópticos OFDM. As simulações descrevem uma rede com nós utilizando diferentes tipos de filtros para análise. Observou-se que, apesar do uso da modulação adaptativa aumentar a complexidade do processamento digital do sinal, essa técnica também aumenta o desempenho de transmissão em até 60%, mostrando-se essencial para tolerância a desalinhamentos dos filtros. Hasegawa, Subramaniam e Sato (2015) propõem um novo esquema de roteamento de modo a minimizar o número de dispositivos comutadores, bem como seus respectivos graus de conectividade, nos cascadeamentos. Sambo et al. (2015) propuseram uma nova abordagem a respeito dos procedimentos de roteamento e atribuição espectral em uma rede óptica elástica. Essa nova abordagem envolveu avaliação da imperfeição do filtro óptico por meio da seleção de parâmetros mais robustos para o sinal em função da quantidade de nós percorridos. Além desses, Khodashenas et al. (2015) destacam o impacto causado pela precisão do filtro no desempenho de uma rede óptica elástica. Eles quantificam o efeito da precisão de um filtro no transmissor e de um filtro SSS com relação à quantidade de espectro necessário para se estabelecer uma conexão eficiente. Por meio de simulações, parâmetros como a resolução e o *roll-off* dos filtros ópticos, bem como a dimensão da unidade dos *slots*, foram avaliados perante a probabilidade de bloqueio da rede, objetivando futura referência para o planejamento de redes e a praticabilidade de se utilizar filtros com melhores características.

É necessário definir uma métrica para medir as penalidades físicas infligidas devido ao formato imperfeito dos filtros ópticos. Estaran et al. (2015) utilizaram um valor de limiar de nós percorridos, sendo estabelecido por meio da análise da degradação da densidade espectral dos sinais ópticos. Outra métrica, proposta nesse trabalho, será apresentada posteriormente.

Kozicki et al. (2009) estudaram o desempenho de redes ópticas elásticas, considerando taxas de transmissão variando de 40 Gbps a 140 Gbps. Foi realizado um estudo sobre efeito da largura de banda dos filtros ópticos, utilizando filtros com transmitâncias gaussianas de ordem variando desde 1 até 8, e larguras “eficazes” a 3 dB variando desde 40 GHz até 70 GHz. Também foi analisado o número máximo de filtros concatenados antes que uma penalidade na relação sinal-ruído óptica (OSNR — *Optical Signal-to-Noise Ratio*) de 1 dB fosse sofrida pelas extremidades das subportadoras. Por sua vez, Nakagawa et al. (2015) investigaram, por meio de simulações, penalidades físicas lineares e não lineares considerando *crosstalk* homodino em redes ópticas elásticas. Nas simulações desse trabalho foram considerados dispositivos cascadeados para formar “supercanais” de transmissão de dados, utilizando a arquitetura *broadcast and select* (Figura 3a) para os nós e fibras monomodo para os enlaces da rede. As simulações levaram em conta as penalidades de imperfeição do filtro óptico e *crosstalk* homodino a partir de canais vizinhos fazendo uso de esquemas de modulação QPSK ou 16-QAM. Os resultados mostraram que as frequentes passagens de sinais por elementos comutadores ao longo do caminho óptico mitigaram as penalidades não lineares mas incrementaram os efeitos da imperfeição do filtro e do *crosstalk* homodino.

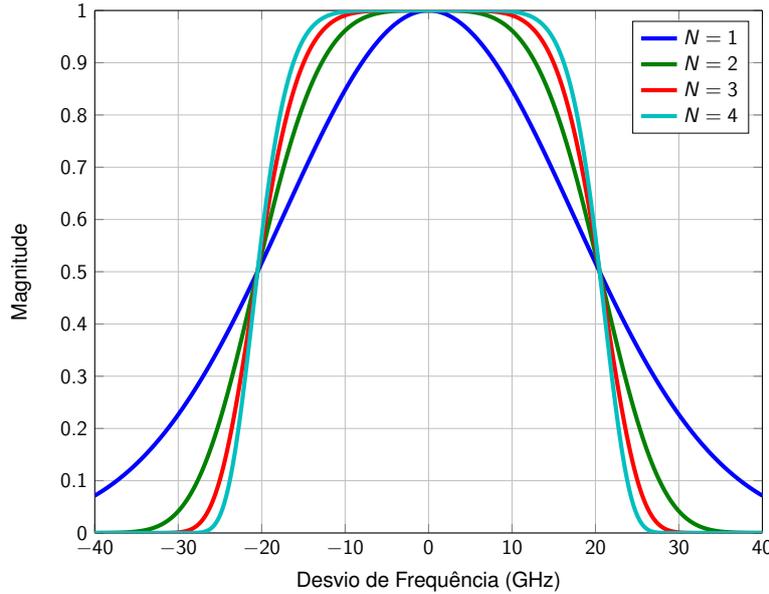
MATERIAIS E MÉTODOS

Foi considerado que os filtros ópticos dos SSS têm um formato gaussiano, ou seja, podem ser descritos por (STRASSER; WAGENER, 2010)

$$|H_{\text{SSS}}(f)| = \exp \left[-\log(2) \left(2 \frac{f - f_c}{\text{BW}_{3\text{dB}}} \right)^{2N} \right], \quad (1)$$

sendo $\text{BW}_{3\text{dB}}$ a largura a 3 dB do filtro passa-faixa, f_c é a frequência central, e N a ordem do filtro. O formato das transmitâncias para várias ordens N pode ser visto na Figura 2. É possível ver que, à medida que aumenta a ordem da gaussiana, mais abrupta passa a ser a queda na sua zona de transição.

Figura 2: Formato das transmitâncias gaussianas para várias ordens.



Nesse trabalho é proposto quantificar a penalidade física devido à imperfeição do filtro óptico através da relação entre as potências ópticas do sinal recebido e do sinal transmitido, r , de acordo com

$$r = \frac{\int_{f_c - \frac{\Delta f}{2}}^{f_c + \frac{\Delta f}{2}} S_{\text{RX}}(f) df}{\int_{f_c - \frac{\Delta f}{2}}^{f_c + \frac{\Delta f}{2}} S_{\text{TX}}(f) df}, \quad (2)$$

em que f_c representa a frequência central da chamada, Δf representa a largura em frequência dos *slots* solicitados para o estabelecimento do pedido de conexão, $S_{\text{TX}}(f)$ é a densidade espectral de potência (DEP) do sinal transmitido e $S_{\text{RX}}(f)$ é a DEP do sinal recebido. É possível relacionar essas duas densidades espectrais de potência, contabilizando o efeito que cada elemento de rede tem sobre a densidade espectral do sinal óptico que o atravessa.

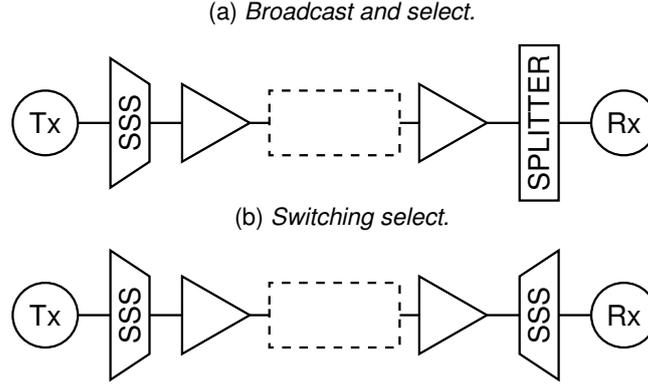
A relação entre a DEP do sinal transmitido e a do sinal recebido dependem das diferentes arquiteturas de nó, tendo em vista que elas empregam diferentes quantidades de elementos comutadores em sua estrutura. As duas arquiteturas consideradas nesse trabalho são a *broadcast and select* e a *spectrum switching* (SI-MEONIDOU; AMAYA; ZERVAS, 2012), e podem ser vistas na Figura 3. Essas arquiteturas diferem entre si somente devido à presença ou não de um elemento SSS na entrada do nó.

Em uma rota com nós de arquitetura *broadcast and select*, como na Figura 3a, a densidade espectral de potência do sinal óptico recebido, para uma rota com ℓ enlaces, é dada por

$$S_{\text{RX}}(f) = S_{\text{TX}}(f) \prod_{i=1}^{\ell} \left[\frac{G_{i,1} G_{i,x} G_{i,2}}{L_{\text{SSS}} L_{i,x} (g_{\text{RX}_i} + 1)} \right] |H_{\text{SSS},p,i,1}(f)|, \quad (3)$$

em que L_{SSS} é a perda linear do elemento de comutação, g_{RX_i} é o grau de conectividade do nó receptor, $G_{i,1}$ é o ganho linear do amplificador de potência, $G_{i,x}$ é o ganho linear total dos amplificadores de linha, $L_{i,x}$ é a perda linear da fibra óptica, $G_{i,2}$ é o ganho linear do pré-amplificador e $H_{\text{SSS},p,i,1}(f)$ representa a transmitância da passagem dos *slots* no nó transmissor, todos relacionados ao i -ésimo enlace.

Figura 3: Arquiteturas de nó.



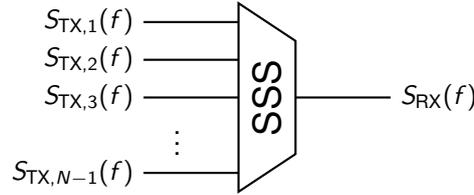
Por sua vez, em uma rota cujos nós tenham a arquitetura *spectrum switching*, como mostrado na Figura 3b, a densidade espectral de potência do sinal óptico recebido, para uma rota com ℓ enlaces, é dada por

$$S_{RX}(f) = S_{TX}(f) \prod_{i=1}^{\ell} \left[\frac{G_{i,1} G_{i,x} G_{i,2}}{L_{SSS} L_{i,x} L_{SSS}} \right] |H_{SSS,p,i,1}(f)| |H_{SSS,p,i,2}(f)|, \quad (4)$$

em que $H_{SSS,p,i,2}(f)$ representa a transmitância da passagem dos *slots* no nó receptor do i -ésimo enlace.

Suponha o elemento óptico de comutação como mostrado na Figura 4.

Figura 4: Elemento óptico de comutação com $N - 1$ entradas e uma saída.



De maneira semelhante ao que foi feito para a imperfeição do filtro óptico, a modelagem analítica proposta para a modelagem do *crosstalk* também se baseia em relacionar a DEP do sinal na saída do SSS, $S_{RX}(f)$, com a DEP na entrada do SSS, $S_{TX}(f)$. Nessa modelagem analítica, entretanto, é levado em consideração o efeito interferente dos outros sinais na entrada do SSS. A relação entre $S_{RX}(f)$ e $S_{TX}(f)$ é dada por

$$S_{RX}(f) = \frac{1}{L_{SSS}} \left[S_{TX,i}(f) |H_{SSS,p}(f)| + \sum_{k=1, k \neq i}^{N-1} S_{TX,k}(f) |H_{SSS,b}(f)| \right], \quad (5)$$

em que $H_{SSS,p}(f)$ representa a transmitância de passagem do sinal óptico pelo SSS, e $H_{SSS,b}$ representa por sua vez a transmitância de bloqueio no intervalo de frequência do sinal óptico desejado. A primeira parte da Equação (5),

$$S(f) = \frac{1}{L_{SSS}} S_{TX,i}(f) |H_{SSS,p}(f)|, \quad (6)$$

representa a densidade espectral de potência do sinal óptico de interesse após sair do SSS, enquanto a segunda parte da Equação (5),

$$X(f) = \frac{1}{L_{SSS}} \left[\sum_{k=1, k \neq i}^{N-1} S_{TX,k}(f) |H_{SSS,b}(f)| \right], \quad (7)$$

representa a densidade espectral de potência do sinal interferente.

Em uma rota com nós de arquitetura *broadcast and select*, como na Figura 3a, a densidade espectral de

potência do sinal óptico recebido, para uma rota com ℓ enlaces, é dada por

$$S_{RX}(f) = S_{TX,i}(f) \prod_{j=1}^{\ell} |H_{SSS,p,j,1}(f)| \left[\frac{G_{j,1} G_{j,x} G_{j,2}}{L_{SSS} L_{j,x} (g_{RX} + 1)} \right] + \sum_{j=1}^{\ell} \left[\sum_{k=1, k \neq i}^{g_{TX,j}+1} \frac{S_{TX,k}(f) |H_{SSS,b,j,1}(f)|}{|H_{SSS,p,j,1}(f)|} \right] \prod_{u=j}^{\ell} |H_{SSS,p,u,1}(f)| \left[\frac{G_{u,1} G_{u,x} G_{u,2}}{L_{SSS} L_{u,x} (g_{RX,u} + 1)} \right]. \quad (8)$$

Dessa forma, tem-se que a densidade espectral de potência do sinal principal $S(f)$ correspondente aos *slots* de interesse é dada por

$$S(f) = S_{TX,i}(f) \prod_{j=1}^{\ell} |H_{SSS,p,j,1}(f)| \left[\frac{G_{j,1} G_{j,x} G_{j,2}}{L_{SSS} L_{j,x} (g_{RX} + 1)} \right], \quad (9)$$

e a do sinal interferente correspondente aos *slots* de interesse $X(f)$ é dada por

$$X(f) = \sum_{j=1}^{\ell} \left[\sum_{k=1, k \neq i}^{g_{TX,j}+1} \frac{S_{TX,k}(f) |H_{SSS,b,j,1}(f)|}{|H_{SSS,p,j,1}(f)|} \right] \prod_{u=j}^{\ell} |H_{SSS,p,u,1}(f)| \left[\frac{G_{j,1} G_{j,x} G_{j,2}}{L_{SSS} L_{j,x} (g_{RX,u} + 1)} \right]. \quad (10)$$

Por sua vez, em uma rota com nós de arquitetura *spectrum switching*, como na Figura 3b, a densidade espectral de potência do sinal óptico recebido, para uma rota com ℓ enlaces, é dada por

$$S_{RX}(f) = S_{TX,i}(f) \prod_{j=1}^{\ell} |H_{SSS,p,j,1}(f)| \left[\frac{G_{j,1} G_{j,x} G_{j,2}}{L_{SSS} L_{j,x} L_{SSS}} \right] |H_{SSS,p,j,2}(f)| + \sum_{j=1}^{\ell} \left[\sum_{k=1, k \neq i}^{g_{TX,j}+1} \frac{S_{TX,k}(f) |H_{SSS,b,j,1}(f)|}{|H_{SSS,p,j,1}(f)|} \right] \prod_{u=j}^{\ell} |H_{SSS,p,u,1}(f)| \left[\frac{G_{u,1} G_{u,x} G_{u,2}}{L_{SSS} L_{u,x} L_{SSS}} \right] |H_{SSS,p,u,2}(f)|. \quad (11)$$

Dessa forma, tem-se que a densidade espectral de potência do sinal principal $S(f)$ correspondente aos *slots* de interesse é dada por

$$S(f) = S_{TX,i}(f) \prod_{j=1}^{\ell} |H_{SSS,p,j,1}(f)| \left[\frac{G_{j,1} G_{j,x} G_{j,2}}{L_{SSS} L_{j,x} L_{SSS}} \right] |H_{SSS,p,j,2}(f)|, \quad (12)$$

e a do sinal interferente correspondente aos *slots* de interesse $X(f)$ é dada por

$$X(f) = \sum_{j=1}^{\ell} \left[\sum_{k=1, k \neq i}^{g_{TX,j}+1} \frac{S_{TX,k}(f) |H_{SSS,b,j,1}(f)|}{|H_{SSS,p,j,1}(f)|} \right] \prod_{u=j}^{\ell} |H_{SSS,p,u,1}(f)| \left[\frac{G_{u,1} G_{u,x} G_{u,2}}{L_{SSS} L_{u,x} L_{SSS}} \right] |H_{SSS,p,u,2}(f)|. \quad (13)$$

Parâmetros de simulação

Foi considerado que os amplificadores de linha compensam exatamente a perda da fibra precedente, o amplificador de potência compensa a perda do SSS na saída do nó, e o pré-amplificador compensa tanto a perda do segmento de fibra óptica precedente quanto do *splitter* ou do SSS na entrada do nó. A transmitância de passagem dos SSSs é uma gaussiana de ordem $N = 4$, com largura de banda “eficaz” a 3 dB igual a 41 GHz. A transmitância de bloqueio dos SSSs é uma gaussiana invertida, de mesmos parâmetros que a gaussiana de passagem, e de profundidade -40 dB. A perda de cada SSS é $L_{SSS} = 5$ dB. Essas transmitâncias podem ser vistas na Figura 5.

Por sua vez, a densidade espectral de potência do sinal na saída do transmissor foi baseada em simulações realizadas no programa proprietário *VPIphotonics*, para um sinal modulado em 4-QAM. Esse sinal pode ser visto na Figura 6.

Figura 5: Transmitâncias de passagem e de bloqueio dos SSSs.

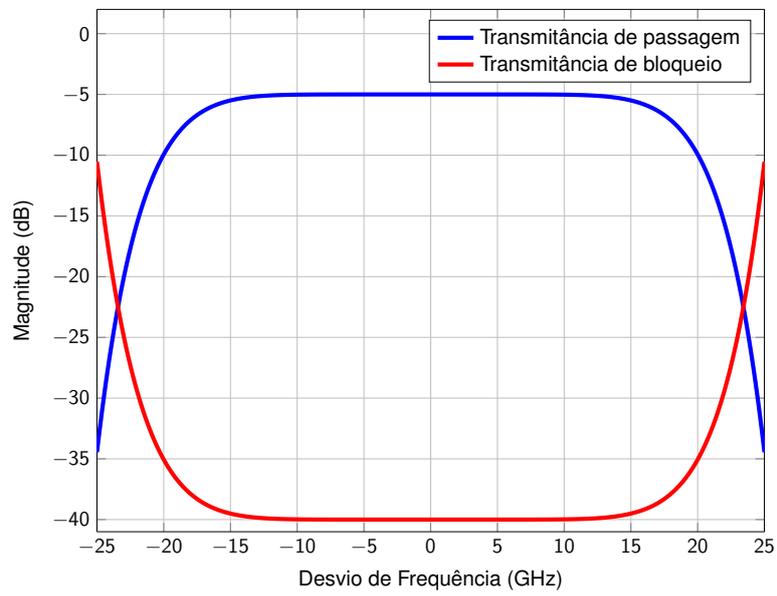
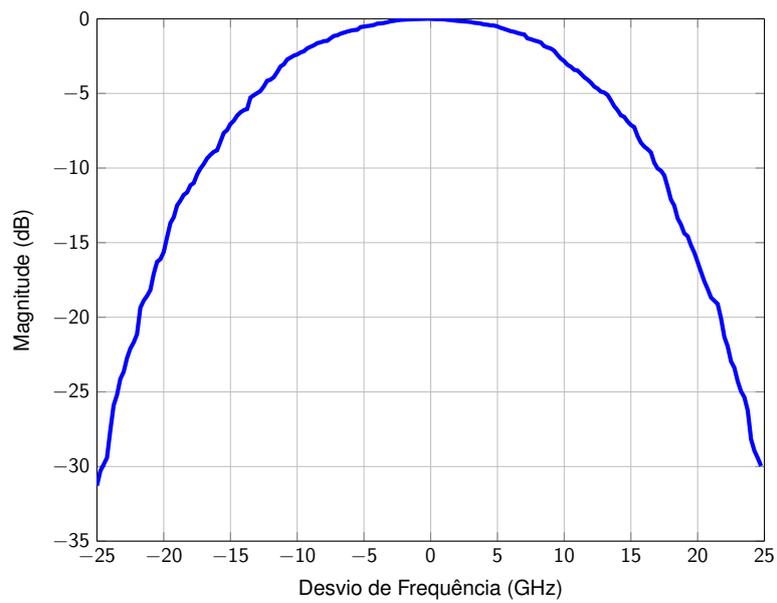


Figura 6: Densidade espectral de potência do sinal na saída do transmissor.



RESULTADOS

Imperfeição do filtro óptico

Devido ao cascadeamento das transmitâncias dos elementos comutadores, como mostrado na Figura 7, à medida que o sinal óptico atravessa mais dispositivos SSS, o formato imperfeito do filtro faz com que a largura de banda do sinal fique cada vez menor. Esse efeito pode ser visto na Figura 8.

Figura 7: Cenário de simulação para imperfeição do filtro óptico.

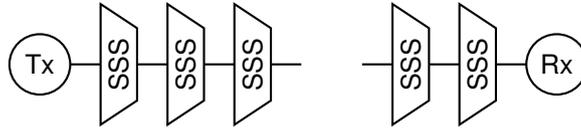
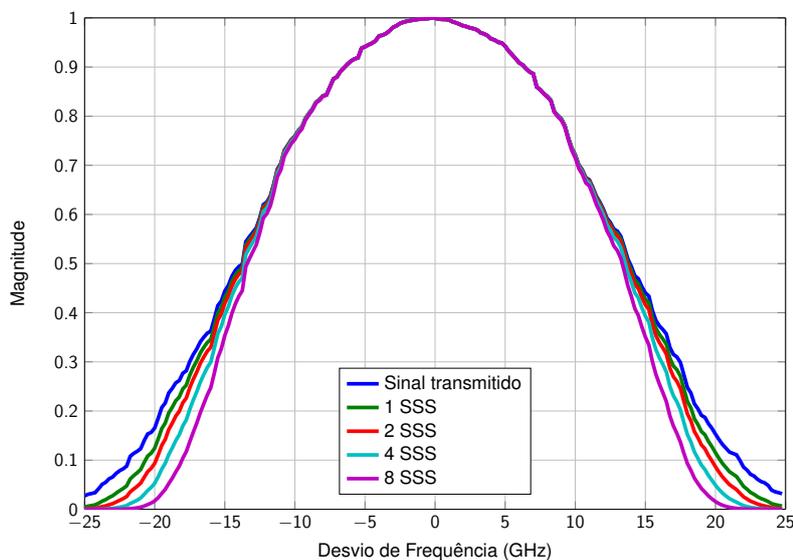


Figura 8: Sinal óptico após atravessar dispositivos SSS.



As penalidades físicas devido ao formato imperfeito do filtro óptico foram analisadas em termos da razão r de potência recebida sobre a potência transmitida, como na Equação (2), para um sinal óptico que atravessava uma quantidade de dispositivos SSS. Esse resultado pode ser visto na Figura 9.

É interessante notar na Figura 9 que, a partir de 4 SSSs, não há mais efeito na razão de limiar em atravessar um SSS adicional.

Crosstalk homodino

O *crosstalk* foi analisado calculando o seu valor pela abordagem tradicional e pela abordagem ponderada (FILER; TIBULEAC, 2012), considerando as transmitâncias mostradas na Figura 5. Por sua vez, foi decidido que no cenário de simulação dois sinais com idênticas densidades espectrais de potência, $S_{TX,1}(f)$ e $S_{TX,2}(f)$, entravam em um SSS, como pode ser visto na Figura 10.

Na saída do SSS, sendo $S_{TX,1}(f)$ o sinal de interesse, as DEP $S(f)$ e $X(f)$ tomam a forma mostrada na Figura 11. O sinal de entrada também é mostrado para propósitos de comparação.

É possível ver na Figura 11 que o sinal principal $S(f)$ e o sinal interferente $X(f)$ tem um formato espectral parecido. Por isso, o valor do *crosstalk* é próximo do valor do *crosstalk* ponderado (FILER; TIBULEAC, 2012). De fato, o valor do *crosstalk* na abordagem clássica é

$$\epsilon_X = -34.9136 \text{ dB}, \quad (14)$$

enquanto o valor do *crosstalk* na abordagem ponderada é

$$\epsilon_{X_w} = -34.9864 \text{ dB}. \quad (15)$$

Figura 9: Razão de potências após o sinal óptico após atravessar vários dispositivos SSSs.

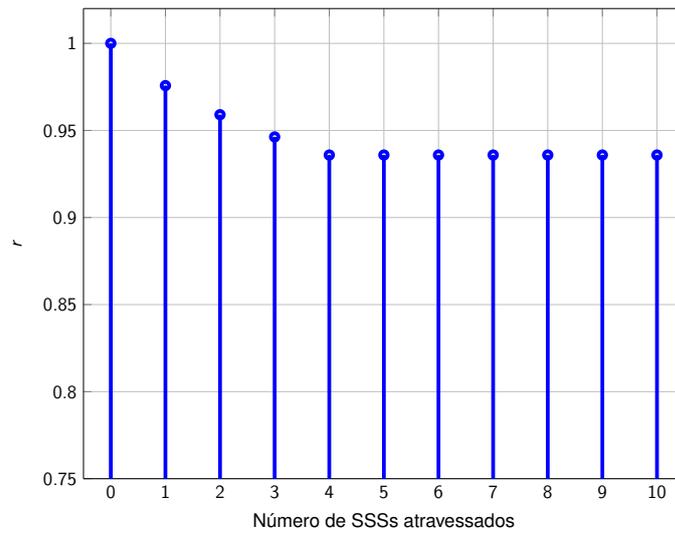
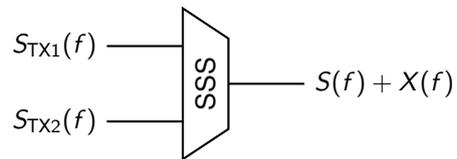


Figura 10: Cenário de simulação para *crossstalk* homodino.



De acordo com os resultados obtidos por simulação utilizando o *VPIPhotonics*, mostrados na Figura 12, a penalidade de OSNR para esse valor de *crossstalk* ponderado é bastante próxima de 0 dB.

Figura 11: Sinais de saída do SSS.

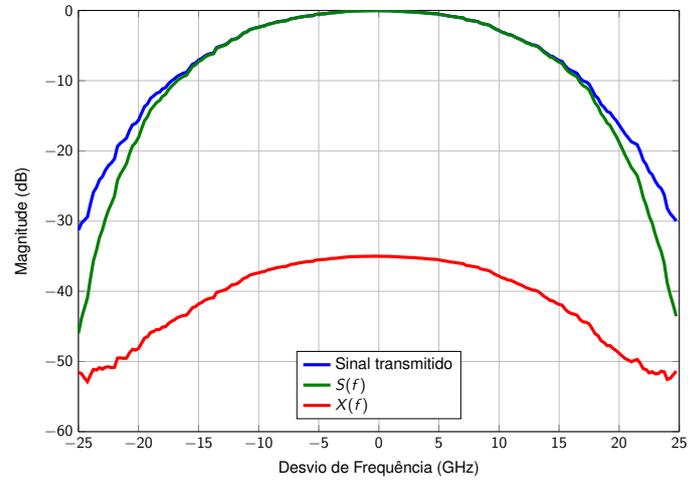
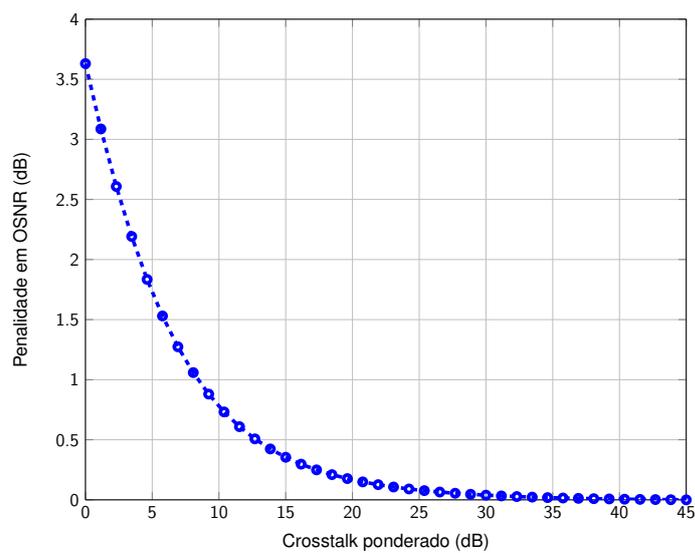


Figura 12: Resultados de simulação no *VPIphotonics* para as penalidades de OSNR em função do valor do crosstalk ponderado.



CONCLUSÕES

Este trabalho propôs modelagens analíticas para a imperfeição do filtro óptico e para o *crosstalk* homodino. A modelagem da imperfeição do filtro óptico relaciona a DEP do sinal recebido após o cascadeamento de dispositivos ópticos na rota, em função da DEP do sinal transmitido. A partir dessa relação, a razão entre as potências do sinal recebido e a do sinal transmitido, na faixa de frequência de interesse (calculadas integrando a DEP nesse intervalo) foram propostas como métrica para quantificar essa penalidade física. Uma modelagem analítica também foi proposta para o *crosstalk* homodino. Em posse das transmitâncias de passagem e de bloqueio dos SSSs, e de maneira semelhante à modelagem proposta para a imperfeição para o filtro óptico, essa modelagem permite calcular a DEP do sinal primário e a do sinal interferente em um sinal óptico que atravessa um número qualquer de dispositivos SSSs.

Em termos da imperfeição do filtro óptico, o concatenamento de dispositivos SSSs faz com que a largura de faixa do sinal óptico seja reduzida, um efeito ilustrado na Figura 8. À medida que o sinal óptico atravessa uma quantidade suficientemente grande de SSSs, não há mais efeito na razão de potências em atravessar um SSS adicional, resultado que pode por sua vez ser visto na Figura 9. Essa informação pode ser relevante para, em um trabalho futuro, definir um limiar de qualidade para a razão de potências, ou seja, um valor mínimo para essa razão que tem de ser garantido para que haja qualidade de transmissão suficiente para implementar uma chamada.

Quanto ao *crosstalk*, a modelagem analítica proposta consegue prever a DEP do sinal recebido após uma série de dispositivos ópticos. Os valores encontrados são próximos do que seria esperado (próximo ao valor da isolamento dos SSSs). Com o valor do *crosstalk* ponderado, foi possível encontrar as penalidades de OSNR equivalentes, através de simulações feitas com o *software VPIphotonics*.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Helder Alves Pereira, pela orientação.

Ao Grupo de Radiometria e à UFCG por permitirem a realização desta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com o apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico — Brasil.

Referências

- ESTARAN, J. et al. Coherent optical orthogonal frequency-division multiplexing for optical slot switched intradatenetcenters networks. In: *Optical Communication (ECOC), 2015 European Conference on*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–3.
- FILER, M.; TIBULEAC, S. Impact of ROADM in-band crosstalk on 40G DPSK signals. In: *Optical Fiber Communication (OFC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference, 2010 Conference on (OFC/NFOEC)*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–3.
- FILER, M.; TIBULEAC, S. Generalized weighted crosstalk for dwdm systems with cascaded wavelength-selective switches. *Opt. Express*, OSA, v. 20, n. 16, p. 17620–17631, Jul 2012. Disponível em: <<http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-20-16-17620>>.
- GIACOUMIDIS, E.; TOMKOS, I.; TANG, J. Adaptive modulation-induced reduction in filter concatenation impairment for optical ofdm metro/regional systems. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 3, n. 7, p. 587–593, Jul 2011. ISSN 1943-0620.
- GUPTA, M. L.; CHATURVEDI, A.; BHOMIA, Y. Estimation of degradation of performance of optical network due to crosstalk. In: *2011 Annual IEEE India Conference*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–4. ISSN 2325-940X.
- HASEGAWA, H.; SUBRAMANIAM, S.; SATO, K. i. Flexible waveband routing optical networks. In: *Communications (ICC), 2015 IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 5198–5203.
- HEISMANN, F. System requirements for WSS filter shape in cascaded ROADM networks. In: *Optical Fiber Communication (OFC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference, 2010 Conference on (OFC/NFOEC)*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–3.
- JINNO, M. et al. Introducing elasticity and adaptation into the optical domain toward more efficient and scalable optical transport networks. In: *2010 ITU-T Kaleidoscope: Beyond the Internet? - Innovations for Future Networks and Services*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–7.
- JINNO, M.; TAKARA, H.; KOZICKI, B. Concept and enabling technologies of spectrum-sliced elastic optical path network (SLICE). In: *2009 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP)*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–2.
- KHODASHENAS, P. S. et al. Impact of filter sharpness on the performance of elastic optical networks. In: *Proceedings of IEEE ICC 2015 — Optical Networks and Systems Symposium*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 5192.
- KOZICKI, B. et al. Filtering characteristics of highly-spectrum efficient spectrum-sliced elastic optical path (SLICE) network. In: *Optical Fiber Communication - includes post deadline papers, 2009. OFC 2009. Conference on*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–3.
- NAKAGAWA, T. et al. Linear and nonlinear impairments when adding and dropping superchannels in an elastic optical network. In: *2015 21st Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 25–28.
- POOLE, S. et al. Bandwidth-flexible ROADMs as network elements. In: *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–3.
- SAMBO, N. et al. Routing, code, and spectrum assignment, subcarrier spacing, and filter configuration in elastic optical networks [invited]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 7, n. 11, p. B93–B100, Nov 2015. ISSN 1943-0620.
- SIMEONIDOU, D.; AMAYA, N.; ZERVAS, G. Infrastructure and architectures on demand for flexible and elastic optical networks. In: *2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–3. ISSN 1550-381X.
- STRASSER, T.; WAGENER, J. Wavelength-selective switches for ROADM applications. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, v. 16, n. 5, p. 1150–1157, Sept 2010. ISSN 1077-260X.
- ZHANG, G. et al. A survey on OFDM-based elastic core optical networking. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 15, n. 1, p. 65–87, Jan 2013.