

Universidade Federal do Ceará
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
PIBITI 2020/2021 (Desenvolvimento Tecnológico e Inovação) - Edital
Nº 5/2020

**Uma proposta de modelagem computacional para correção de
transientes temporais em amplificadores ópticos**

Resumo

Os amplificadores ópticos são dispositivos eletrônicos que tem como função amplificar o sinal de luz, transmitindo um sinal óptico a longas distâncias. O desempenho desses dispositivos depende de um controle de forma otimizada, para que os dispositivos dos equipamentos ópticos, como fotodetectores, não sejam danificados. Diversos trabalhos encontrados na literatura abordam o problema de controle de um Amplificador óptico através da construção de algoritmos para o controlador proporcional integral derivativo (PID) em plataformas embarcadas. Os principais problemas dessas implementações residem na forma como os controladores são projetados a partir de bibliotecas já existentes, o que torna o processo de sintonia uma tarefa lenta e dispendiosa. Dessa forma, o projeto tem dois objetivos gerais: i) realizar a modelagem matemática através de cálculos computacionais que simulem a resposta dos amplificadores; ii) a implementação de um algoritmo embarcado capaz de fornecer a melhor resposta de controle para transientes temporais aplicados em amplificadores ópticos. Por se tratar de um algoritmo versátil, serão verificadas diferentes configurações do controlador PID a fim de obter diferentes resultados por intermédio da imposição de polos e zeros em plano complexo, testadas previamente nos cálculos computacionais. A resposta de um amplificador óptico com fibra dopado com érbio (EDFA) ou amplificador de Raman será simulada em uma placa FRDM-KL46Z de modo que o algoritmo desenvolvido, situado em uma outra placa FRDM-KL25Z, atue em malha fechada e forneça um feedback para o sistema de controle proposto. Por fim, os resultados obtidos no osciloscópio serão comparados com o modelo projetado nos cálculos computacionais para validação do controlador.

1. Introdução

As comunicações ópticas representam atualmente um grande avanço tecnológico na transmissão de informações em longa distância [1,2]. A construção de tecnologias que permitissem alta velocidade no envio de informações sem grandes perdas e interferências externas, que por sua vez, causam degradação e atenuação do sinal por meio de fenômenos elétricos e magnéticos, sempre foi de interesse humano [3]. No entanto, para que o ramo das telecomunicações ópticas tivesse a grande importância como conhecemos hoje, foi necessário a criação de uma base proposta por Albert Einstein lançada no ano de 1905 que, resultaria em anos mais tarde, na criação do laser e da fibra óptica por meio do fenômeno da emissão estimulada de fótons [6].

Existem muitas vantagens no uso de fibras ópticas na transmissão de sinais digitais tanto em curtas como em longas distâncias; entretanto, embora apresente características bastante vantajosas quando comparada a outros meios de transmissão como rádio, satélite, cabo coaxial ou par trançado, a fibra óptica está sujeita a alguns efeitos que degradam os sinais por ela transmitidos [2,7]. Um dos efeitos que degradam os sinais na fibra óptica consiste na atenuação que o sinal óptico sofre ao percorrer a fibra. Este efeito é bastante conhecido, e deve-se principalmente ao

fenômeno de espalhamento de luz conhecido como espalhamento Rayleigh [8]. A atenuação devida ao espalhamento Rayleigh depende do comprimento de onda do sinal transmitido através da fibra. A menor atenuação na fibra de sílica ocorre na região do espectro óptico onde a luz apresenta comprimento de onda em torno de 1550 nm [4,8,9].

Por essa razão, a transmissão por fibra óptica em longas distâncias ocorre principalmente em torno deste comprimento de onda, conhecido como "terceira janela espectral". Os valores típicos de atenuação nesta janela são da ordem de 0,25 dB/km, o que significa dizer que, após percorrer 80 km de fibra, o sinal é atenuado em cerca de 20 dB, ou, em unidades lineares, 100 vezes menor do que o valor inicial [5,8]. Por outro lado, os equipamentos ópticos de recepção apresentam limites de recepção bastante estreitos, com valores tipicamente entre -25 e -35 dBm de potência recebida, enquanto os sinais ópticos são transmitidos com níveis de potência em torno de 0 dBm. Considerando os desvios resultantes das margens de operação e as perdas nas emendas da fibra, num enlace de 100 km o sinal se encontra bem próximo dos limites de tolerância do dispositivo de recepção. Na prática, entretanto, existem ligações de sistemas de longa distância, cujos enlaces ultrapassam os 100 kms, implicando na necessidade da recuperação do nível do sinal ao longo do enlace. Para resolver tal problema são utilizados amplificadores a fibra dopada com érbio (EDFAs) ou amplificadores Raman [10].

O avanço da tecnologia de multiplexação por divisão em comprimento de onda (Wavelength Division Multiplexing - WDM) permitiu a combinação de múltiplos sinais ópticos, devidamente espaçados entre si, a serem injetados e transmitidos em uma única fibra óptica monomodo com largura de banda ultrapassando a faixa de 180 Gbps [1,3,4,11,12]. Essa capacidade permitiu com que sistemas mais robustos de transmissão e recepção fossem desenvolvidos para acompanhar a complexidade e o aumento no tráfego de dados pelos usuários. A grande quantidade de dispositivos e aplicações distintas ligados a rede mostram a evolução das tecnologias que promovem diferentes formas de conectividade, e que evidenciam fortemente, a presença da computação pervasiva e da nova era dos serviços baseados em streaming no cotidiano das pessoas.

Apesar desse grande avanço na transmissão de informações, ainda é inevitável a perda de potência na transmissão de dados em sistemas ópticos de comunicação quando sinais percorrem grandes distâncias [13]. Isso afeta a propagação do sinal devido a efeitos lineares como, por exemplo, fenômenos de atenuação e dispersão que dificultam a decodificação da informação em dispositivos receptores. Para contornar essa situação, repetidores optoeletrônicos foram largamente utilizados a fim de compensar as perdas resultantes da interação eletromagnética do sinal de luz com os materiais da fibra. No entanto, com o advento da tecnologia WDM, dispositivos eletrônicos como repetidores ficaram obsoletos devido suas limitações na amplificação de vários canais com diferentes comprimentos de onda [16]. Para isso, foi desenvolvido amplificadores que regeneram o sinal de entrada sem a necessidade da utilização de circuitos elétricos para essa operação, realizando dessa forma, toda a conversão em domínio óptico graças ao fenômeno quântico de emissão estimulada.

Atualmente, um amplificador a fibra dopada com Érbio (Erbium-Doped Fiber Amplifier - EDFA) é o mais difundido em sistemas ópticos de comunicação devido a suas características de largura de banda, alto índice de amplificação e baixo grau de ruído na saída [3]. No entanto, existem dificuldades quando desejam controlar a resposta temporal de um EDFA por conta do seu comportamento dinâmico ser sensível a flutuações de potência na entrada [17]. Isso ocorre devido ao fator de amplificação ser dependente da frequência do sinal transmitido em cada canal, fazendo deste modo, com que efeitos transientes ocorram podendo causar perdas de informação no receptor e danificar dispositivos como fotodetectores devido a ausência de estabilidade e precisão fornecida por um sistema automatizado que realize essa tarefa específica.

A criação de um algoritmo de controle digital com ajuste de ganho que represente a dinâmica do amplificador a partir de uma função de transferência. Essa resposta do sistema pode ser emulada para fins de simulação e, conseqüentemente, implementada em uma planta ou processo real utilizando um sistema computacional embarcado para execução do algoritmo [3]. Esse tipo de abordagem permite que dispositivos como fotodetectores não sejam prejudicados devido a

variações abruptas no sinal de amplificação.

Vale ressaltar que, a modelagem do EDFA deva ter a maior confiabilidade, para auxiliar no projeto de sistemas ópticos [1,11,18]. Por exemplo, atualmente os EDFAs geralmente operam no regime de saturação de ganho. O ganho é um parâmetro do EDFA que depende de uma série de características físicas e de operação do amplificador, como concentração de dopante na fibra dopada, comprimento da fibra dopada, potência de bombeio e potência de sinal [17]. Para uma potência de bombeio fixa, quando a potência de sinal é variada, o ganho pode também variar, sendo de forma mais pronunciada se o nível de saturação for maior. Modelos simples de simulação podem prever este tipo de comportamento com precisão. No entanto, num sistema onde vários canais são amplificados simultaneamente, o ganho do EDFA mantém a mesma dependência com a potência óptica total de entrada; porém, se, por exemplo, a potência de cada canal é fixa, as variações de ganho podem ser fruto do número de canais acoplados [1,11,19]. Além disto, se a não uniformidade do espectro de ganho também é considerada, um mesmo canal pode ter um ganho maior ou menor dependendo do nível de saturação.

A literatura permite a adaptação da teoria para o desenvolvimento dos algoritmos de simulação [12,17]. De posse destas, para as situações de operação mono e multicanal, os programas de simulação gerados proporcionam a observação do comportamento dos principais parâmetros do EDFA, como o ganho, o comprimento ótimo da EDF e ruído, geralmente na forma de gráficos. Para tanto, faz-se uso de interfaces criadas para se tornar mais simples a utilização do programa, onde o usuário entra com as condições de simulação desejadas.

O problema que será abordado neste trabalho apresenta os aspectos de supressão de transientes em controle feedback para a obtenção de resultados satisfatórios através da construção de um algoritmo embarcado, que, por sua vez, visa garantir melhores especificações de desempenho temporal como overshoot e tempo de acomodação. Através disso, pode-se agregar dispositivos computacionais na automação de amplificadores ópticos a fim de motivar na proposta de soluções adequadas para a continuação da pesquisa em torno das tecnologias de amplificação óptica em redes multiplexadas de alta velocidade.

2. Perguntas de Partida

A função de transferência utilizada atualmente pode ser otimizada, melhorando o tempo de acomodação, o sobresinal (overshoot) e a estabilidade?

Os programas computacionais trazem soluções que podem ser validadas experimentalmente?

Qual o melhor algoritmo embarcado que pode otimizar o sinal do amplificador óptico?

3. Hipóteses

Os principais parâmetros que caracterizam o comportamento dinâmico de EDFAs são ganho, figura de ruído e potência de saída. O ganho G de um amplificador óptico, é definido como sendo o logaritmo da razão entre a potência do sinal de saída e do sinal de entrada. Além disso, o ganho depende da concentração dos íons dopantes do amplificador, do comprimento da fibra dopada, da potência de bombeio e do nível de sinal de entrada no amplificador. Esses parâmetros são largamente utilizados para otimização do controle e das características de ganho destes dispositivos [4].

O trabalho de Novak et al. Mostra como implementar a equação de Bononi %u2013 Rusch usando simulação de Simulink e como aplicar esse modelo ao problema da modulação de ganho em amplificadores ópticos [20]. Os resultados previstos para as funções de transferência bomba-sinal e sinal-sinal são mostrados em boa concordância com o experimento. A caixa de ferramentas Simulink do MATLAB para simular sistemas dinâmicos tem a vantagem de ser bem conhecida e facilmente acessível. As únicas limitações são a memória e o tempo de execução.

Para a criação da função de controle digital e implementá-la no código, é necessário, primeiramente, discretizar a função de transferência da planta por meio de um bloco segurador de

ordem zero. Isso permitirá que uma relação direta por meio de equações de diferenças possa ser embarcada no microcontrolador de forma digital, fazendo com que, para aquisição de amostras em tempo real pelo conversor A/D, seja necessário o armazenamento dos coeficientes. Em seguida, é possível alocar devidamente os pólos e zeros de acordo com as especificações de projeto no plano Z e encontrar a função de transferência que representa o controlador digital no domínio discreto. Após a realização dessa análise com suporte do MATLAB, pode comparar seus resultados com o controlador projetado utilizando o algoritmo proposto na placa FRDM KL25Z.

4. Objetivos

Objetivo Geral

Simular o ganho de controle em amplificadores ópticos utilizando modelagem computacional. Além disso, controlar características na resposta simulada e transitória de amplificadores ópticos EDFA utilizando um microcontrolador NXP/Freescale KL25Z para o problema de ganho automático em supressão de efeitos temporais aplicados a redes WDM.

Objetivos Específicos

• Realizar simulações em softwares matemáticos como MATLAB ou RSTUDIO para verificação de testes entre os controladores e comparar os resultados obtidos pelo osciloscópio.

• Utilizar métodos de alocação por polos e zeros no plano complexo para o projeto de controladores discretos em malha fechada.

• Implementar um algoritmo embarcado genérico de controle digital por meio da discretização de sinais analógicos.

• Implementar um algoritmo (simulado anteriormente) que retorne melhores respostas em especificações de desempenho como redução de overshoot e tempo de acomodação.

5. Materiais e Métodos

A metodologia do trabalho consistirá nas seguintes etapas: i) pesquisa bibliográfica sobre amplificadores ópticos e os algoritmos utilizados na modelagem de ganho de amplificação; ii) construção de um modelo matemático para a modelagem computacional; iii) utilizar as respostas obtidas no modelo computacional como parâmetros para a construção dos algoritmos embarcados que simulem a dinâmica do controlador.

A modelagem computacional dependerá da função de transferência que será fruto de uma pesquisa bibliográfica que represente a dinamicidade de um amplificador óptico. A partir dela, pode-se desenvolver análises e conclusões que resultam em possíveis propostas. Implicando numa comparação com o que é feito atualmente no mercado e para que se adapte a novas formas e técnicas adequadas a fim de uma solução mais otimizada.

As placas Freedom boards são excelentes plataformas para o estudo e implementação de aplicações diversas utilizando os microcontroladores ARM Cortex-M0 da NXP. Para a realização de testes entre os controladores projetados, se faz necessário a criação de um firmware embarcado para a construção do algoritmo de controle proposto. A placa FRDM KL25Z é uma plataforma de baixo custo equipada com um microcontrolador ARM Cortex-M0 da série Kinetis L. Este tipo de microcontrolador possui 126 kB de memória flash, 16 kB de memória SRAM, USB e pode operar na faixa de até 48 MHz (NXP, 2019). Além disso, a placa conta com um touch capacitivo, acelerômetro MMA8451Q, Led RGB, Interface de programação e debug OpenSDA. Para programação, é possível utilizar diversas plataformas como mBed compiler da ARM, Kinetis Design Studio (KDS) ou

MCUXpresso IDE. Esta última foi utilizada para criar o firmware de controle e deixá-lo pronto para a realização de testes.

Enquanto que, a placa de desenvolvimento é bastante similar à Freedom board FRDM KL25Z com as mesmas configurações, diferenciando-se apenas na inclusão de um controlador para display LCD de segmentos e na série do microcontrolador utilizado, na qual se enquadra na série Kinetis L-KL4x (NXP, 2019). A utilização dessa placa diz respeito as limitações de canais D/A presente em ambas plataformas. Como a proposta deste trabalho é utilizar o máximo de recursos computacionais presentes em microcontroladores atuais, então seria necessário 2 canais D/A para gerenciar o sistema em malha fechada com um único RTOS. Como isso não é possível, foi estabelecido a utilização das duas placas separadamente.

Conversores D/A são utilizados para converter as palavras digitais do computador para um nível de tensão e, às vezes, são referidos como dispositivos de sample e holder. Eles oferecem saídas analógicas de um sistema computacional para a condução de atuadores, por isso sua grande utilização na geração de variáveis de controle. A ideia básica de sua operação é que os bits binários formem interruptores para abrir ou fechar, assim encaminhando a corrente elétrica através de uma rede de resistência adequada para gerar o nível de tensão correto. Os microcontroladores utilizados, possuem um conversor D/A de 12 e 8 bits. Este sinal pode ser configurado para um único pino externo ou para um contador analógico. Através disso, é possível representar fielmente a resposta de um Amplificador óptico e colocá-lo em uma malha de controle.

6. Dados Preliminares

Através da pesquisa bibliográfica foi encontrada a seguinte função de transferência $G(s) = 3570/(s^2 + 52,5s + 3629)$ para um ponto de operação específico de potência [21]. A partir dela, foram desenvolvidas análises e conclusões que resultam em possíveis propostas para que, o que é feito atualmente no mercado, se adapte a novas formas e técnicas adequadas a fim de uma solução mais otimizada.

A Figura 1 representa a resposta temporal da função de transferência especificada para um resposta ao degrau feita no MATLAB a partir da equação da função de transferência. Nela, percebe-se três pontos de interesse para o projeto dos controladores neste trabalho. O primeiro e mais importante parâmetro que deseja-se controlar, representado por OV, representa o sobressinal ou o overshoot do sistema. Como mencionado anteriormente, ele representa a porcentagem que ultrapassa o nível de referência e equivale a 21,8%. Controlar este tipo de parâmetro é bastante considerável em nesse projeto, uma vez que um pico de overshoot pode vir a comprometer o funcionamento de fotodetectores.

Porém, pela Figura 1, é perceptível que o sistema não estabiliza-se em uma referência unitária, como seria desejado na maioria dos projetos de controle. Nesse caso, o sistema possui um erro em regime permanente que é calculado pelo Teorema do valor final, representado por $V_f = 0,984$. Por último, outro ponto bastante importante para o projeto de controladores é o tempo de acomodação do sistema. De acordo com o MATLAB, um tempo de acomodação para o critério de 5 % equivale a 86,8 ms, um tempo bastante considerável.

7. Referências Bibliográficas

- [1] R. Martins, B. De Godoy, Modelagem Dinâmica do EDFA e o Controle Totalmente Óptico de Ganho, 2010.
- [2] A.F.H. and J.C.R.F. de Oliveira, Método e dispositivo de amplificação óptica do erro de SHB e faixa dinâmica generalizada, 2010.
- [3] L. Zhu, General computer model for both erbium-doped fiber amplifier and fiber Raman amplifier, (2020) 1805%u20131808. <https://doi.org/10.1117/1.1486459>.

- [4] R. Sharma, S.K. Raghuwanshi, Computer Model for EDFA Dynamics Over 1525 %u2013 1560 nm Band Using a Novel Multi- Wavelength MATLAB Simulink Test Bed for 8- Channels, 2063 (2017). <https://doi.org/10.1080/03772063.2017.1369908>.
- [5] S. Ten Nissov Morten, Alexei Pilipetskii, Golovchenko Ekaterina, System and method of dispersion compensation in optical communication system, 2002.
- [6] B. Tian, Y. Gao, H. Zhu, Variable-coefficient higher-order nonlinear Schrödinger model in optical fibers%u202F: Variable-coefficient bilinear form , Bäcklund transformation , brightons and symbolic computation, 366 (2007) 223%u2013229. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2007.02.098>.
- [7] Y. TANAKA, Method of cotrolling optical transmitter optical transmitter, 16/191,031, 2019.
- [8] J. César R.F. de O. João Batista Rosolem, AMPLIFICADOR OPTICO COM CONTROLE AUTOMATICO DE GANHO, 2009.
- [9] M.A. Khamis, Dynamic investigation of gain-clamped thulium and erbium- doped fiber amplifiers for reconfigurable WDM systems%u202F: comparative study, J. Opt. 49 (2020) 76%u201382. <https://doi.org/10.1007/s12596-019-00581-7>.
- [10] S. Raju, T. Nadu, M. Arunachalam, T. Nadu, SURVEY ON VARIOUS PERSPECTIVES OF RAMAN, (2020) 247%u2013259.
- [11] A. Chrestani, B. Feec, A. Acunha, Modelagem Estática e Dinâmica do Amplificador a Fibra Dopada com Érbio para Sistemas WDM, 2007.
- [12] M.A. Qamhan, A.A. Qamhan, Y.A. Alotaibi, I.M. Al-harkan, Mathematical Modeling and Discrete Firefly Algorithm to Optimize Scheduling Problem with Release Date , Sequence-Dependent Setup Time , and Periodic Maintenance, 2019 (2019).
- [13] T. Chu, P. Wang, C. Zhu, Modeling of Active Fiber Loop Ring-Down Spectroscopy Considering Gain Saturation Behavior of EDFA, 38 (2020) 966%u2013973.
- [14] A. Photonics, P. Montreal, P. Montreal, Theoretical investigations of power fluctuations statistics in Brillouin erbium-doped fiber lasers, 27 (2019) 37508%u201337515.
- [15] A. Charlet G., Jean-Cristophe, Method for cotrolling the power of an optical amplifier, 2004.
- [16] E.A. Golovchenko, A.N. Pilipetskii, N.S. Bergano, C.R. Davidson, F.I. Khatri, R.M. Kimball, V.J. Mazurczyk, Modeling of Transoceanic Fiber-Optic WDM Communication Systems, 6 (2000) 337%u2013347.
- [17] B. Ohtusiki, Tomoko and Miura, Jutarou and Fukusuhima, Masaru and Wang, System, method and computer program product for modeling EDFA, WO 2004/044559 A2, 2004.
- [18] D. Cassioli, S. Scotti, A. Mecozzi, A Time-Domain Computer Simulator of the Nonlinear Response of Semiconductor Optical Amplifiers, 36 (2000) 1072%u20131080.
- [19] M.I.M. Azur, J.O.S. Chröder, A. Bel, L.O. Iesgo, T.S.Y. Oshida, M.A.K. Arlsson, P.E.A.A. Ndrekson, Overhead-optimization of pilot-based digital signal processing for flexible high spectral efficiency transmission, 27 (2019) 24654%u201324669.
- [20] S. Novak, R. Gieske, Simulink Model for EDFA Dynamics Applied to Gain Modulation, 20 (2002) 986%u2013992.
- [21] S. Song, D.E. Chang, K.Y. Lee, H. Kim, A Singular Perturbation-Like Approach to EDFA Gain Control Based on Observer Techniques, 10 (2015) 1864%u20131876.

8. Plano de Atividades

Mês	Bolsista 1
1	Revisão bibliográfica
2	Elaborar apresentações sobre os modelos existentes
3	Aprender a fazer os cálculos computacionais
4	Utilizar os programas computacionais e aplicar os modelos existentes
5	Buscar construir um modelo

6	Obter os resultados teóricos do modelo e analisar
7	Montar o algoritmo embarcado
8	Realizar testes experimentais para validar o modelo
9	Desenvolver um artigo para os encontros universitários
10	Realizar uma pesquisa bibliográfica sobre as patentes existentes
11	Descrever e analisar os resultados visando artigos científicos ou patente
12	Descrever e analisar os resultados visando artigos científicos ou patente