



Trabalho de Conclusão de Curso

Adaptação de técnica de interpolação linear para a estimação do sinal de saída de amplificadores ópticos com entrada não plana

de Allan Amaro Bezerra da Silva

orientado por

Prof. Dr. Erick de Andrade Barboza

Universidade Federal de Alagoas
Instituto de Computação
Maceió, Alagoas
4 de Junho de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
Instituto de Computação

**ADAPTAÇÃO DE TÉCNICA DE INTERPOLAÇÃO LINEAR
PARA A ESTIMAÇÃO DO SINAL DE SAÍDA DE
AMPLIFICADORES ÓPTICOS COM ENTRADA NÃO
PLANA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto de Computação da Universidade
Federal de Alagoas como requisito parcial
para a obtenção do grau de Engenheiro de
Computação.

Allan Amaro Bezerra da Silva

Orientador: Prof. Dr. Erick de Andrade Barboza

Banca Avaliadora:

Ícaro Bezerra Queiroz de Araújo Prof. Dr., UFAL
Thiago Damasceno Cordeiro Prof. Dr., UFAL

Maceió, Alagoas
4 de Junho de 2021

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecário Responsável: Jone Sidney A. de Oliveira – CRB-4 - 1485

| | |
|-------|--|
| S586a | <p>Silva, Allan Amaro Bezerra da. Adaptação de técnica de interpolação linear para a estimação do sinal de saída de amplificadores ópticos com entrada não plana / Allan Amaro Bezerra da Silva, - 2021. 40 f. : il. col.</p> <p style="text-align: center;">Orientador: Prof. Dr. Erick de Andrade Barboza. Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Computação) – Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Computação. Maceió, 2021.</p> <p style="text-align: center;">Bibliografia: f. 39-40.</p> <p style="text-align: center;">1. Telecomunicações. 2. Redes Ópticas 3. Sinal Óptico - Amplificador Óptico. 4. Interpolação Linear. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.39</p> |
|-------|--|

Dedicatória

Dedico este trabalho ao meu pai Amaro, que não viveu para vê-lo concluído mas que foi um dos responsáveis por cada palavra escrita aqui.

Allan Amaro Bezerra da Silva

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço aos meus pais e a toda minha família por não terem medido esforços em apoiar todas as minhas escolhas durante o curso, suporte esse sem o qual eu não teria chegado até aqui. Agradeço aos amigos que fiz durante a graduação, pelo companheirismo, pelos grupos de estudo, pelas tardes de lanches e, principalmente, pelas risadas, sem as quais esse caminho teria sido muito mais difícil. Agradeço aos professores que deram os seus melhores e que me mostraram que a relação professor-aluno não se limita às salas e aos horários de aula, em especial ao Prof. Dr. Erick de Andrade Barboza, por abrir meus olhos ao mundo da pesquisa e por tornar este trabalho possível.

20 de maio de 2021, União dos
Palmares - AL

Allan Amaro Bezerra da Silva

Words are flowing out like endless rain into a paper cup.

John Lennon

Resumo

A Internet tem sido o cenário do aumento no tráfego de dados. Diante desse consumo, as redes ópticas são uma boa opção de uso por conta de sua grande largura de banda. Nelas, os amplificadores ópticos possuem papel fundamental ao compensar perdas de potência que o sinal sofre durante a transmissão, ao mesmo tempo em que o degrada através da adição de distorções e ruídos. É preciso adaptá-los para que seu funcionamento seja autônomo e favoreça a qualidade da transmissão. Assim surge o problema ACOP (*Adaptive Control of Operating Point*), cujo objetivo é adequar a configuração do amplificador de acordo com o estado da rede. Nas soluções da literatura é fundamental que o conjunto de pontos de operação do amplificador, chamado de máscara de potência, seja conhecido. Para oferecer uma maior granularidade no espaço dos pontos de operação definidos nas máscaras, existem técnicas capazes de estimar o comportamento do amplificador em pontos não definidos, porém nem todas levam em consideração não linearidades nos sinais, comuns em cenários reais. Neste trabalho é proposta uma adaptação de uma das técnicas de estimação de sinais ópticos da literatura, baseada em interpolação linear, de maneira a fazê-la considerar máscaras de potência com sinais não planos. As avaliações mostram que a adaptação foi capaz de aprimorar o desempenho da técnica original, que apresentou medidas de erro muito maiores que as da técnica proposta aqui. Ainda, a adaptação foi capaz de obter resultados semelhantes e, em diversos casos, melhores que uma outra técnica da literatura, baseada em redes neurais artificiais.

Palavras-chave: Telecomunicações; Redes Ópticas; Amplificador Óptico; Sinal Óptico; Interpolação Linear.

Abstract

The Internet has been the scene of increased data traffic. Given this consumption, optical communication networks are a good option to use because of their large bandwidth. In them, optical amplifiers play a fundamental role in compensating for power losses that the signal suffers during transmission, while degrading it through the addition of distortions and noise. It is necessary to adapt them so that their operation is autonomous and favors transmission quality. Thus, the ACOP (*Adaptive Control of Operating Point*) problem arises, whose objective is to adapt the amplifier configuration according to the state of the network. In the solutions in the literature, it is essential that the set of amplifier operating points, called the power mask, is known. To offer greater granularity in the space of the operating points defined in the masks, there are techniques capable of estimating the amplifier's behavior at undefined points, but not all of them take into account non-linearities in the signals, common in real-world scenarios. This work proposes an adaptation of one of the optical signal estimation techniques in the literature, based on linear interpolation, in order to make it consider power masks with non-plane signals. The evaluations show that the adaptation was able to improve the performance of the original technique, which presented error measures much greater than those of the technique proposed here. Furthermore, the adaptation was able to obtain similar results and, in several cases, better than another technique in the literature, based on artificial neural networks.

Keywords: Telecommunications; Optical Networks; Optical Amplifier; Optical Signal; Linear Interpolation.

Lista de Figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Máscara de potência de um amplificador óptico para determinado parâmetro do mesmo. (Fonte: [de Andrade Barboza, 2017].) | 17 |
| 2.2 | Espectro da potência de saída de três sinais com diferentes medidas de <i>tilt</i> . (Fonte: adaptado de [de Andrade Barboza et al., 2021].) | 18 |
| 2.3 | Máscaras de potência produzidas a partir da caracterização de um amplificador <i>EDFA</i> com sinais de entrada com <i>tilt</i> de $-12dB$ (a), planos (b) e com <i>tilt</i> de $12dB$ (c), mensurando o <i>ripple</i> dos sinais de saída. (Fonte: cedida pelo orientador.) | 19 |
| 2.4 | Fluxo de execução da técnica TIP da literatura. (Fonte: adaptado de [Fei et al., 2015].) | 23 |
| 2.5 | Estrutura do modelo <i>Spectrum-Tilt</i> da literatura. (Fonte: adaptado de [de Andrade Barboza et al., 2021].) | 24 |
| 3.1 | Fluxo de execução da técnica TIP- <i>Tilt</i> proposta neste trabalho. (Fonte: autor.) | 27 |
| 4.1 | Sinal óptico de entrada (a) do cenário 1, com seu sinal óptico de saída e sua respectiva estimação pela técnica TIP- <i>tilt</i> (b). | 31 |
| 4.2 | Sinal óptico de entrada (a) do cenário 2, com os sinais retornados pelas duas instâncias do estimador TIP original (b), além do sinal óptico real de saída e sua respectiva estimação pela técnica TIP- <i>tilt</i> (c). | 31 |
| 4.3 | Sinal óptico de entrada (a) do cenário 3, com seu sinal óptico de saída e sua respectiva estimação pela técnica TIP- <i>tilt</i> (b). | 32 |
| 4.4 | <i>Boxplots</i> da distribuição do erro médio (a) e máximo (b) de teste no amplificador <i>EDFA1</i> , considerando todos os <i>folders</i> nas técnicas TIP e TIP- <i>Tilt</i> | 33 |
| 4.5 | <i>Boxplots</i> da distribuição do erro médio (a) e máximo (b) de teste no amplificador <i>EDFA2</i> , considerando todos os <i>folders</i> nas técnicas TIP e TIP- <i>Tilt</i> | 33 |
| 4.6 | Estimação das técnicas TIP e TIP- <i>Tilt</i> do sinal que apresentou a mediana do erro máximo absoluto na técnica TIP, para o amplificador <i>EDFA1</i> (a) e <i>EDFA2</i> (b). | 34 |

| | | |
|-----|---|----|
| 4.7 | <i>Boxplots</i> da distribuição do erro de teste médio (a) e máximo (b) no amplificador <i>EDFA1</i> , considerando todos os <i>folds</i> no modelo <i>Spectrum-Tilt</i> e no estimador <i>TIP-Tilt</i> | 35 |
| 4.8 | <i>Boxplots</i> da distribuição do erro de teste médio (a) e máximo (b) no amplificador <i>EDFA2</i> , considerando todos os <i>folds</i> no modelo <i>Spectrum-Tilt</i> e no estimador <i>TIP-Tilt</i> | 36 |
| 4.9 | Estimação das técnicas <i>Spectrum-Tilt</i> e <i>TIP-Tilt</i> do sinal que apresentou a mediana do erro máximo absoluto no modelo <i>Spectrum-Tilt</i> , para o amplificador <i>EDFA1</i> (a) e <i>EDFA2</i> (b). | 36 |

Lista de Abreviaturas

- ACOP** Adaptative Control of Operating Point (controle adaptativo do ponto de operação).
- EDFA** Erbium-Doped Fiber Amplifier (amplificador de fibra dopada com érbio).
- OSNR** Optical Signal to Noise Ratio (relação sinal ruído óptica).
- P_{en}** Potência de entrada.
- P_{sa}** Potência de saída.
- QoT** Quality of Transmission (qualidade de transmissão).
- RNA** Rede Neural Artificial.
- TIP** Total Input Power (potência total de entrada).
- WDM** Wavelength Division Multiplexing (multiplexação por comprimento de onda).
- WSO** Wavelength Switched Optical Network (rede óptica comutada por comprimento de onda).

Sumário

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introdução | 13 |
| 1.1 | Objetivos | 14 |
| 1.1.1 | Objetivo geral | 14 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 14 |
| 1.2 | Justificativa | 15 |
| 1.3 | Estrutura do texto | 15 |
| 2 | Fundamentação Teórica | 16 |
| 2.1 | Amplificador óptico | 16 |
| 2.1.1 | Máscara de potência | 17 |
| 2.2 | ACOP | 19 |
| 2.3 | Estimação do espectro da potência de saída de amplificadores ópticos | 20 |
| 2.3.1 | Técnicas da literatura | 20 |
| 3 | Metodologia | 25 |
| 3.1 | Adaptação proposta | 25 |
| 3.2 | Configuração experimental | 26 |
| 3.2.1 | Implementação | 26 |
| 3.2.2 | Pré-processamento dos dados | 28 |
| 3.2.3 | Treinamento e teste | 28 |
| 3.3 | Métricas de avaliação | 29 |
| 4 | Resultados | 30 |
| 4.1 | Validação do funcionamento da técnica <i>TIP-Tilt</i> | 30 |
| 4.2 | Avaliação comparativa entre as técnicas <i>TIP</i> e <i>TIP-Tilt</i> | 34 |
| 4.3 | Avaliação comparativa entre o modelo <i>Spectrum-Tilt</i> e a técnica <i>TIP-Tilt</i> | 35 |
| 5 | Conclusão | 38 |
| | Bibliografia | 39 |

Capítulo 1

Introdução

De acordo com [Index, 2017], a Internet tem sido o cenário de um aumento substancial de tráfego de dados, muito por conta da cada vez mais crescente utilização de serviços de comunicação digital que demandam muita banda de transmissão. Diante desse consumo, para [de Andrade Barboza, 2017] as redes de comunicações ópticas se mostram como uma boa opção de utilização, especialmente pela sua grande largura de banda e por já serem usadas como *backbone* de várias outras redes. Dessa forma, as redes ópticas se veem na necessidade de suportar uma quantidade enorme de tecnologias de serviços e de transmissão, devendo ainda cumprir com requisitos distintos de qualidade de serviço.

Segundo [Winzer et al., 2018], nesse contexto dinâmico e diverso, as redes ópticas tem o desafio de observar mudanças e gerenciar dispositivos e configurações de maneira eficiente, sendo necessária a apresentação de características como auto-configuração e auto-otimização. Para [Movahedi et al., 2012], essa necessidade implica na elaboração de uma rede dotada da capacidade de reconfiguração, que não dependa da intervenção humana para tomar decisões.

No ambiente das redes ópticas, os amplificadores ópticos possuem um papel fundamental na medida em que compensam as perdas de potência que um sinal óptico sofre durante a sua transmissão, através de um ganho pré-determinado. Por outro lado, de acordo com [Moura et al., 2012], além de amplificar o sinal, o amplificador também o degrada através de distorções em sua forma e da adição de ruído. Segundo [Olsson, 1989], é preciso adaptar esses equipamentos de maneira que o seu funcionamento se dê de forma autônoma e favoreça a qualidade da transmissão do sinal.

Dessa forma define-se o problema ACOP (*Adaptive Control of Operating Point*), ou o controle adaptativo do ponto de operação, neste caso, de amplificadores ópticos. Segundo [de Andrade Barboza, 2017], este problema caracteriza-se pela sua multi-objetividade, diante de sua pretensão em adequar a configuração do amplificador de acordo com o estado da rede, de maneira a equilibrar elementos conflitantes como o ganho de potência aplicado, a distorção e o ruído inseridos no sinal óptico e até mesmo o consumo de energia do equipamento.

Na literatura, algumas propostas já foram apresentadas, como em [Barboza et al., 2017] e em [Barboza et al., 2018], sendo para elas fundamental que os possíveis pontos de operação do amplificador sejam conhecidos. Em [Moura et al., 2012] foi definida uma técnica capaz de automatizar o processo de caracterização de um amplificador óptico a partir de valores de ganho, potência de entrada e espectro de frequência. O conjunto de pontos de operação resultante desse processo é chamado de máscara de potência.

De maneira a oferecer uma maior granularidade no espaço dos pontos de operação do amplificador definidos nas máscaras de potência, é necessário o desenvolvimento de técnicas capazes de estimar o comportamento do amplificador em pontos não definidos pela caracterização. Para isso, algumas técnicas já foram propostas na literatura, como os modelos baseados em rede neural artificial (RNA) em [de Andrade Barboza et al., 2021] e um modelo numérico baseado em interpolação linear em [Fei et al., 2015]. São técnicas capazes de estimar o espectro de potência de saída de um amplificador para pontos de operação arbitrários, a partir do conhecimento contido nas máscaras de potência.

Como visto em [Barboza et al., 2018], as técnicas ACOP que levam em consideração não linearidades nos sinais ópticos, como a não planicidade do ganho no espectro de frequência e os já citados ruídos, apresentam resultados comprovadamente melhores que as demais, demonstrando a importância do aprimoramento das técnicas de estimação através do uso de dados de caracterização compostos por sinais de entrada não planos (com *tilt*). Porém, algumas soluções propostas levam em consideração apenas máscaras de potência referentes a sinais de entrada planos, como é o caso do estimador TIP (*Total Input Power*, ou potência total de entrada) proposto em [Fei et al., 2015], evidenciando um cenário com espaço para exploração.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Contribuir com a resolução do problema ACOP através do aprimoramento de uma técnica de predição do espectro de saída de sinais ópticos em amplificadores ópticos, em específico do estimador TIP proposto em [Fei et al., 2015], considerando cenários de redes ópticas compostas por sinais não planos.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Reproduzir o estimador TIP proposto em [Fei et al., 2015] e verificar o seu desempenho ao estimar a potência de saída de sinais não planos em um amplificador óptico.

2. Adaptar o estimador TIP para fazê-lo considerar o espectro de potência e a distorção de sinais não planos e investigar o seu desempenho na estimativa da potência de saída de sinais com *tilt* em um amplificador óptico.
3. Reproduzir o modelo *Spectrum-Tilt* proposto em [de Andrade Barboza et al., 2021] e usá-lo como parâmetro de comparação para o estimador TIP adaptado.

1.2 Justificativa

A principal motivação para o desenvolvimento da adaptação proposta neste trabalho vem do fato de que, na literatura, apenas o modelo *Spectrum-Tilt* utiliza a informação de *tilt* na estimação da potência de saída de sinais ópticos de maneira satisfatória, sendo desejado o desenvolvimento de alternativas para fins comparativos. O estimador TIP foi escolhido como alvo da adaptação em razão de ser baseado no cálculo da potência total de entrada do sinal, sendo esse o mais comum de ser realizado, o que torna esta uma técnica de execução simples, principalmente em relação ao modelo baseado em RNA. Além disso, o algoritmo apresentou bons resultados em [Fei et al., 2015] utilizando apenas a máscara plana, o que torna promissora a sua adaptação para um novo cenário de máscaras com *tilt*.

1.3 Estrutura do texto

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica usada como referência neste trabalho. No Capítulo 3 é descrita a metodologia empregada nos experimentos realizados. O Capítulo 4 apresenta a validação da adaptação proposta e os resultados obtidos nos experimentos. Por fim, no Capítulo 5 são dadas as conclusões e os possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta a base teórica relevante ao entendimento deste trabalho, consistindo na definição de amplificador óptico, máscara de potência e *tilt*. Apresenta ainda uma breve descrição do problema ACOP e do processo de estimação da saída de amplificadores ópticos, e expõe as técnicas existentes na literatura que foram utilizadas durante os experimentos.

2.1 Amplificador óptico

Os amplificadores ópticos são dispositivos inseridos em uma rede óptica com a finalidade de compensar as perdas que acometem o sinal óptico durante a sua transmissão. Segundo [Barboza, 2013], a sua introdução se deu como uma maneira de viabilizar a transmissão de sinais ópticos em múltiplas frequências, de maneira simultânea e em uma mesma fibra óptica, num conceito conhecido como *Wavelength Division Multiplexing* (WDM), ou multiplexação por comprimento de onda. Isso permitiu um aumento substancial na velocidade de transmissão desses sinais, como também favoreceu o uso das redes WSON (*Wavelength Switched Optical Network*, ou rede óptica comutada por comprimento de onda), onde, segundo [de Andrade Barboza, 2017], os comprimentos de onda são usados na definição de múltiplos canais de comunicação, de maneira que o amplificador consegue aplicar um ganho de potência em todos eles simultaneamente.

No cenário de transmissão óptica multicanais, o primeiro modelo de amplificador proposto foi o *EDFA* (*Erbium-Doped Fiber Amplifier*), ou amplificador de fibra dopada com érbio. Segundo [Barboza, 2013], o *EDFA* se tornou bastante popular especialmente por conta de sua simplicidade e pela vasta disponibilidade de seus componentes.

Uma das características de um amplificador *EDFA* é dada pela quantidade de estágios que ele possui. Um estágio consiste em um segmento de fibra no amplificador, além dos componentes intrínsecos ao mesmo, como o *laser* de bombeio e o isolador. Dessa forma, uma abordagem em múltiplos estágios implica em dividir a fibra em mais segmentos e multiplicar os demais componentes, de maneira a aplicar em parcelas o ga-

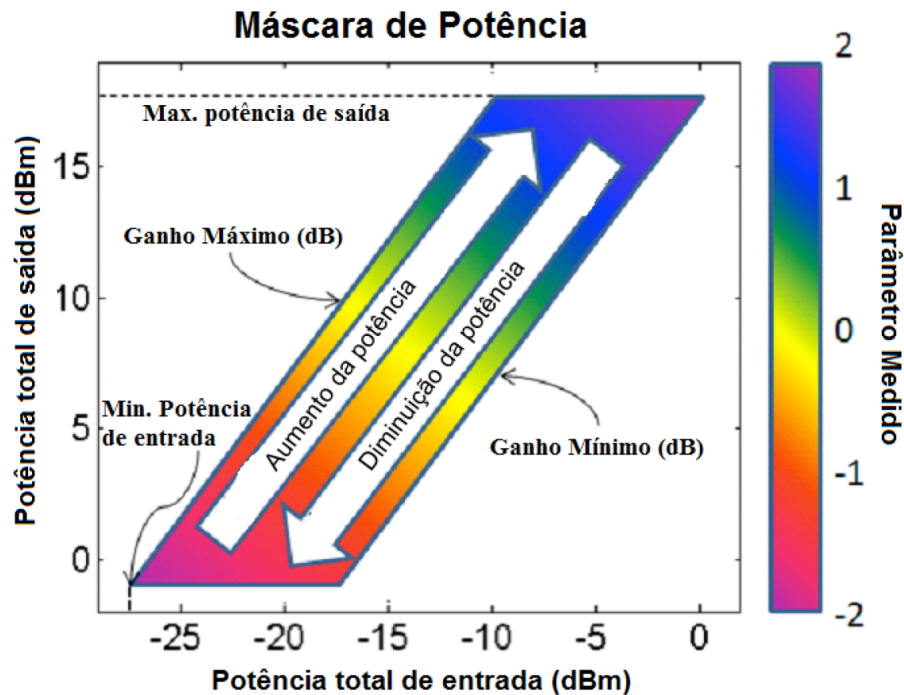


Figura 2.1: Máscara de potência de um amplificador óptico para determinado parâmetro do mesmo. (Fonte: [de Andrade Barboza, 2017].)

nhos de potência desejado. Amplificadores *EDFA* com dois estágios foram propostos em [Harun et al., 2003] com o objetivo de aprimorar o ganho de sinais ópticos e diminuir a figura de ruído.

2.1.1 Máscara de potência

De maneira a mapear a região de operação dos amplificadores ópticos e estabelecer uma fonte de informação importante a respeito de seu comportamento prático, [Moura et al., 2012] estabeleceu um processo de caracterização feita em laboratório que define os seus pontos de operação. O resultado desse processo é chamado de máscara de potência, consistindo em uma relação entre as informações fornecidas ao amplificador, como intervalos de valores de potência de entrada, os canais de frequência utilizados e o ganho desejado, e as informações retornadas pelo amplificador, como a potência de saída por canal de frequência e ganho aplicado, a figura de ruído (*noise figure*) e o consumo de energia do equipamento.

A Figura 2.1 exibe a representação gráfica de uma máscara de potência de um amplificador óptico, para um certo parâmetro retornado pelo mesmo, considerando um intervalo de potência total de entrada, no eixo horizontal, e os respectivos ganhos aplicados, que aumentam horizontalmente da direita para a esquerda, entre as linhas diagonais. No eixo vertical, é exibido o intervalo da potência total de saída. Através das linhas que compõem o elemento central do gráfico, são identificáveis os valores de potência total de entrada mínima e potência total de saída máxima, bem como ganho máximo e mínimo aplicado.

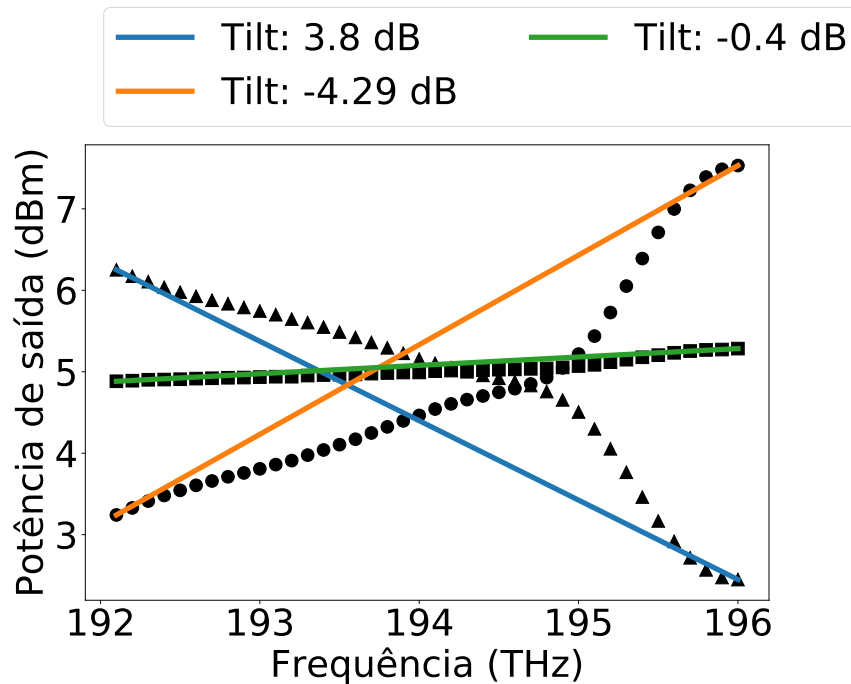


Figura 2.2: Espectro da potência de saída de três sinais com diferentes medidas de *tilt*. (Fonte: adaptado de [de Andrade Barboza et al., 2021].)

O comportamento do parâmetro medido pode ser observado através de uma escala de cores, de acordo com a paleta apresentada à direita da máscara.

Tilt

Um aspecto negativo do processo de amplificação de sinais ópticos se dá pela inserção de ruídos e distorções na forma do sinal, o que ocasiona uma degradação da OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*, ou relação sinal ruído óptica). Segundo [de Andrade Barboza, 2017], características físicas do modelo *EDFA* provocam variações no espectro de ganho dos sinais amplificados, ocasionando ganhos distintos em cada canal e afetando a medida de planicidade de ganho (*gain flatness*) do amplificador, dada pela variação máxima de ganho entre os canais amplificados.

Nesse contexto, segundo [de Andrade Barboza et al., 2019], uma das métricas de qualidade de um amplificador é o *tilt*, utilizado para quantificar a distorção de um sinal óptico através do coeficiente angular da reta que representa a diferença linear existente entre as potências nos seus canais de frequência, sendo uma característica de sinais não planos. De maneira prática, o *tilt* de um sinal pode ser calculado, em *dB*, pela diferença entre as potências de seu canal de menor e maior frequência.

A Figura 2.2 apresenta o espectro da potência de saída de três sinais com medidas diferentes de *tilt*, destacando com retas os aspectos de um *tilt* positivo, um negativo e um

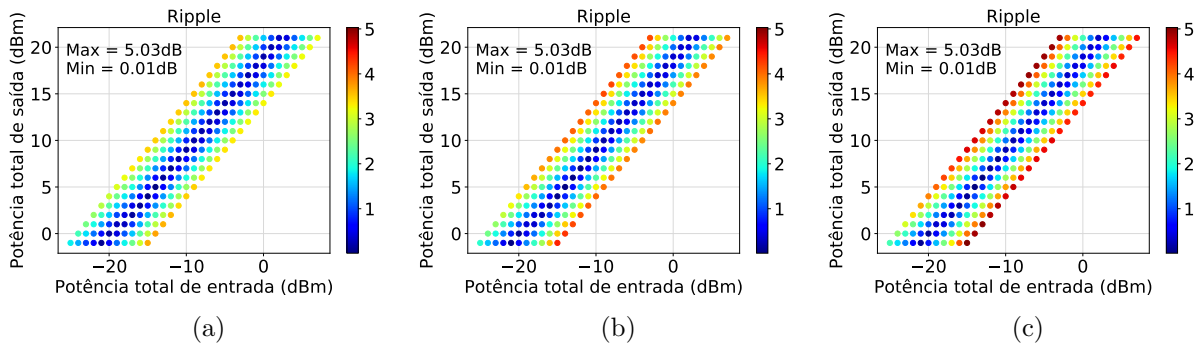


Figura 2.3: Máscaras de potência produzidas a partir da caracterização de um amplificador *EDFA* com sinais de entrada com *tilt* de -12dB (a), planos (b) e com *tilt* de 12dB (c), mensurando o *ripple* dos sinais de saída. (Fonte: cedida pelo orientador.)

outro próximo de 0dB .

É válido dizer que o processo de caracterização de amplificadores pode ser realizado tanto com sinais planos quanto com sinais não planos, resultando, respectivamente, em uma máscara plana ou em máscaras não planas, com medidas de *tilt*. A Figura 2.3 apresenta as máscaras de potência resultantes do processo de caracterização de um amplificador *EDFA* comercial a partir de sinais de entrada com e sem *tilt*, tendo como parâmetro medido o *ripple* dos sinais de saída. Foram utilizados sinais com *tilt* de -12dB (Figura 2.3a), sinais planos (Figura 2.3b) e sinais com *tilt* de 12dB (Figura 2.3c).

2.2 ACOP

Segundo [de Andrade Barboza, 2017], o problema do controle adaptativo do ponto de operação de amplificadores ópticos pode ser definido como a seleção de um ponto de operação para o amplificador de acordo com um indicador de qualidade, sendo esse indicador uma característica do próprio amplificador, como a figura de ruído e o *ripple*, ou da rede óptica, como a OSNR.

A partir das máscaras de potência resultantes do processo de caracterização, as técnicas que resolvem o problema ACOP são capazes de definir uma configuração de ganho para amplificadores em uma rede óptica, de maneira a minimizar os efeitos não lineares aplicados aos sinais ópticos amplificados. [de Andrade Barboza, 2017] diz que flutuações de potência causadas por um controle incorreto de ganho nos amplificadores podem causar desde danos aos receptores, no caso de potências muito altas, até a falha no reconhecimento dos dados transmitidos, no caso de uma atenuação exagerada da potência do sinal óptico.

Dessa forma, para garantir uma boa QoT (*Quality of Transmission*, ou qualidade de transmissão), torna-se essencial a existência de máscaras de potência que abranjam de maneira mais granular a região de operação do amplificador, possibilitando aos métodos

de resolução do ACOP uma definição mais precisa do ponto de operação.

2.3 Estimação do espectro da potência de saída de amplificadores ópticos

A estimação do espectro de saída dos amplificadores é adotada como uma solução para a necessidade de expandir as máscaras de potência para pontos de operação não caracterizados. Se dá através da implementação de algoritmos capazes de tomar as máscaras de potência existentes como base de informação e usá-las para prever aspectos do sinal óptico de saída após a amplificação de sinais arbitrários, como a potência de saída por canal e a figura de ruído.

2.3.1 Técnicas da literatura

Diversas técnicas para estimação da saída de amplificadores já foram propostas na literatura, a exemplo do TIP proposto em [Fei et al., 2015], e do modelo de RNA *Spectrum-Tilt* proposto em [de Andrade Barboza et al., 2021]. Ambas as propostas foram idealizadas com base na caracterização de amplificadores *EDFA*, considerando sinais ópticos distribuídos em 40 canais de frequência.

TIP

O TIP é um estimador proposto na forma de um *framework* de modelagem numérica baseada em interpolação linear, onde se assume que o ganho que cada canal de frequência recebe do amplificador é uma função da potência total de entrada do sinal óptico, independente da potência apresentada em cada canal. Esse *framework* é composto pela combinação de 4 módulos, sendo eles:

- Módulo 1: *Finer Spectrum Granularity*, ou granularidade fina de espectro, é responsável por estender a lista de frequências da máscara além daquelas usadas na caracterização, através de interpolação linear.
- Módulo 2: *Continuous Input Power Values*, ou valores contínuos de potência de entrada, é responsável por estender os valores de potência total de entrada da máscara além dos usados na caracterização, de maneira similar ao Módulo 1.
- Módulo 3: *Unequally Powered Input Signals*, ou sinais de entrada de potências desiguais, é responsável por considerar cada canal de frequência de maneira individual na estimação da potência de saída do sinal, de maneira a cobrir casos em que a potência de entrada é diferente entre os canais.

- Módulo 4: *Non-Fully-Loaded Span*, ou intervalo incompletamente carregado, é responsável por considerar casos em que nem todos os canais de frequência são usados pelo sinal óptico, estimando a potência de saída apenas dos canais carregados.

O fluxo de execução da técnica TIP pode ser observado na Figura 2.4. Possui como entrada, em (1), as 40 potências de entrada do sinal óptico, o conjunto de frequências correspondentes aos 40 canais desse sinal, além do ganho de potência desejado, totalizando 81 valores de entrada. Como saída, em (FIM), entrega 40 valores referentes à estimação do espectro da potência de saída em cada canal de frequência utilizado.

O seu funcionamento se dá com base no Módulo 3, em (2a), pela função

$$P_{out}(f_i) = P_{in}(f_i) \cdot g(f_i, P_{in}, G_{set}),$$

onde $P_{in}(f_i)$ e $P_{out}(f_i)$ são, respectivamente, as potências de entrada e saída do canal de frequência f_i , e g é a função que retorna o ganho de potência desse canal, recebendo a frequência do mesmo, a potência total de entrada P_{in} do sinal (calculada pela soma das potências de entrada de todos os canais do sinal óptico) e o ganho desejado G_{set} no amplificador. Esse cálculo é realizado para todos os canais de frequência do sinal de entrada. Caso nem todos os canais estejam carregados, a mesma função é executada, porém pelo Módulo 4, em (2b), e apenas para os canais carregados.

A função g é definida no Módulo 2, em (3), como

$$g(f_i, \hat{P}_{in}, G_{set}) = (1 - x) \cdot s(f_i, P_{in}^-, G_{set}) + x \cdot s(f_i, P_{in}^+, G_{set}),$$

onde \hat{P}_{in} é a potência total de entrada do sinal recebida pela função g , que pode ou não existir na máscara de caracterização. Por conta disso, a função s é executada duas vezes, uma para P_{in}^- e outra para P_{in}^+ , com ambas as potências presentes na máscara de potência e sendo $P_{in}^- \leq \hat{P}_{in} \leq P_{in}^+$. Além disso, a função s recebe ainda a frequência f_i do canal cujo ganho de potência se deseja estimar e o ganho desejado G_{set} . De maneira a usar o conceito de interpolação, é aplicada uma multiplicação no ganho retornado pelas chamadas da função s , onde $x = \frac{\hat{P}_{in} - P_{in}^-}{P_{in}^+ - P_{in}^-}$.

A função s é definida no Módulo 1, em (4), como

$$s(\hat{f}_k, P_{in}, G_{set}) = (1 - x) \cdot m(f_i, P_{in}, G_{set}) + x \cdot m(f_{i+1}, P_{in}, G_{set}),$$

onde \hat{f}_k é a frequência do canal recebida pela função s cujo ganho deve ser estimado, que pode ou não existir na máscara de potência. Por esse motivo, a função m é executada para duas frequências, f_i e f_{i+1} , sendo elas as frequências mais próximas de \hat{f}_k presentes na máscara de caracterização. Da mesma forma que no Módulo 2, a interpolação das informações é feita através da multiplicação por um fator $x = \frac{\hat{f}_k - f_i}{f_{i+1} - f_i}$.

A função m é responsável por consultar a máscara de caracterização do amplificador e

retornar o ganho de potência correspondente aos canais de frequência f_i e f_{i+1} , para um sinal de potência total de entrada P_{in} e para um ganho desejado G_{set} no amplificador.

O *framework* incorpora ainda a função *Gain Matching*, ou correspondência de ganho. Ela é responsável por corrigir o ganho de potência estimado pelo função g ao fim da execução do algoritmo, de maneira a torná-lo mais próximo do ganho real aplicado no sinal óptico pelo amplificador. Caso a função *Gain Matching* seja utilizada, a execução do TIP partindo do Módulo 3 ou 4 é modificada para

$$\hat{P}_{out}(f_i) = P_{in}(f_i) \cdot \frac{G_{set}}{G_{tot}} \cdot g(f_i, P_{in}, G_{set}),$$

onde $\hat{P}_{out}(f_i)$ é a potência de saída estimada no canal de frequência f_i corrigida pelo *Gain Matching*, dada pela multiplicação entre o ganho estimado e o fator formado pela divisão do ganho desejado G_{set} pelo ganho total G_{tot} . O ganho total é calculado pela razão entre a potência total de saída P_{out} (calculada pela soma das potências de saída de todos os canais do sinal óptico) e a potência total de entrada P_{in} do sinal óptico.

É importante destacar que a técnica TIP utiliza como base de consulta apenas a máscara de potência resultante da caracterização do amplificador com sinais planos, a qual deve ser armazenada.

Spectrum-Tilt

O *Spectrum-Tilt* é um modelo de RNA que considera em sua estimação, além da máscara de potência plana, as máscaras não planas. Tem como atributos de entrada os 40 valores de potência do sinal de entrada do amplificador, referentes aos 40 canais usados na caracterização, bem como os valores correspondentes ao ganho desejado e ao *tilt* desse sinal, totalizando 42 valores de entrada. Como saída, entrega 40 valores referentes à predição da potência de saída dos 40 canais de frequência do sinal de entrada.

A estrutura desse modelo é apresentada na Figura 2.5, onde é possível constatar que ele é composto por duas camadas ocultas constituídas de 55 neurônios cada, valor esse definido por meio do cálculo de dois terços da soma da quantidade de atributos de entrada com a quantidade de atributos de saída. Entre essas camadas, existe uma camada de *dropout* com taxa de desativação de neurônios de 10%. Por fim, existe uma camada de saída com 40 neurônios, representando os 40 atributos de saída do modelo. Tanto as camadas ocultas quanto a camada de saída utilizam a função sigmoide como função de ativação.

É importante destacar que este modelo, após o treinamento, não precisa armazenar as máscaras de potência, já que o conhecimento usado na predição se encontra modelado em sua estrutura de neurônios.

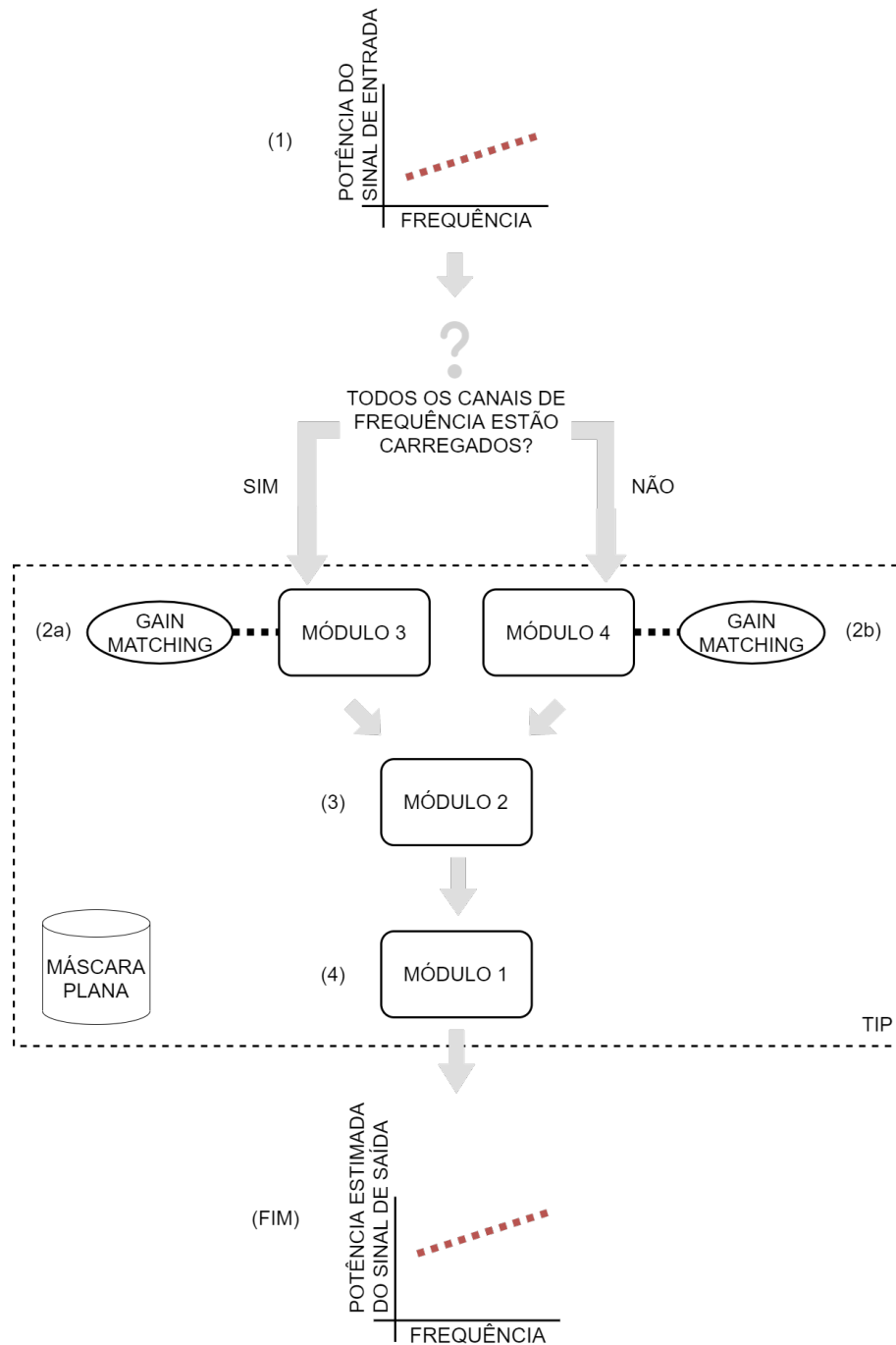


Figura 2.4: Fluxo de execução da técnica TIP da literatura. (Fonte: adaptado de [Fei et al., 2015].)

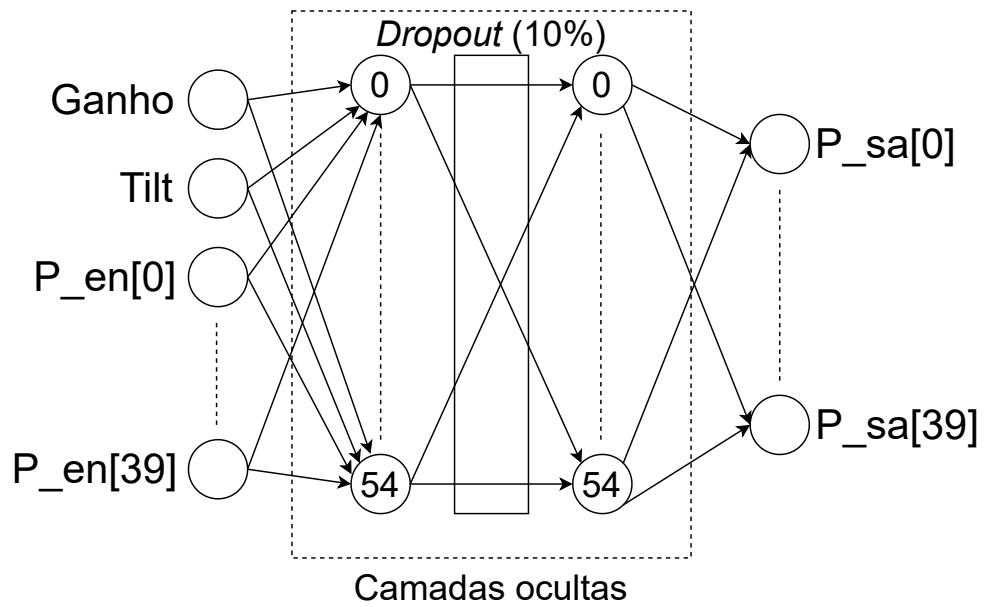


Figura 2.5: Estrutura do modelo *Spectrum-Tilt* da literatura. (Fonte: adaptado de [de Andrade Barboza et al., 2021].)

Capítulo 3

Metodologia

Neste capítulo é apresentada a metodologia deste trabalho. Inicia-se com a descrição da adaptação proposta para o estimador TIP apresentado na Seção 2.3.1. Em seguida, é apresentada a configuração dos experimentos realizados e as ferramentas utilizadas durante o processo, passando pela fase de pré-processamento dos dados, que inclui também uma descrição dos amplificadores e de suas respectivas máscaras de potência. Finaliza com a apresentação das métricas de avaliação das técnicas abordadas.

3.1 Adaptação proposta

O fluxo de execução do TIP com as modificações que serão propostas nesta seção pode ser observado na Figura 3.1. A técnica resultante desta adaptação será chamada de TIP-*Tilt*.

O estimador TIP-*Tilt* leva em consideração os mesmos 81 atributos de entrada da técnica original em (1), com os mesmos 40 atributos de saída do TIP em (FIM). O seu principal diferencial se dá pela estimação do *tilt* do sinal de entrada em (2) e pela adição de máscaras não planas à sua base de consulta original em (3). O objetivo é verificar se o desempenho da técnica é melhorado com o uso dessas informações. Após a estimação do *tilt*, o conjunto de máscaras conhecidas pela técnica é consultado de maneira a selecionar a máscara de caracterização cujo *tilt* é equivalente ao estimado para o sinal de entrada. A partir deste ponto, o algoritmo pode seguir dois caminhos, a depender se a base possui ou não uma máscara com o mesmo *tilt* do sinal de entrada. Em caso afirmativo, tal máscara é selecionada em (4.1) e utilizada como base de consulta no estimador TIP em (5.1), que retorna a potência estimada do sinal de saída em (FIM). Em caso negativo, são selecionadas as máscaras com *tilt* maior mais próximo e menor mais próximo existentes na base em relação ao *tilt* do sinal de entrada, representadas em (4.2a) e (4.2b). Dessa forma, cada máscara selecionada é usada como base de consulta em chamadas independentes do estimador TIP, em (5.2a) e (5.2b), de maneira que cada chamada retorna a potência estimada de um sinal de saída correspondente à estimação com base em sua respectiva máscara, sendo esses sinais representados em (6a) e (6b). Os dois sinais resultantes são

então interpolados seguindo a mesma abordagem do algoritmo TIP original, na forma

$$P_{out}(f_i) = (1 - x) \cdot P_{out}(f_i)_{6a} + x \cdot P_{out}(f_i)_{6b}$$

onde $P_{out}(f_i)$ é a potência estimada do sinal de saída em (FIM), dada pela soma ponderada das potências de saída $P_{out}(f_i)_{6a}$ e $P_{out}(f_i)_{6b}$, estimadas em (6a) e (6b) respectivamente. Tal ponderação é feita por um fator $x = \frac{T-T^-}{T^+-T^-}$, onde T é o *tilt* estimado em (2) do sinal de entrada, com T^+ e T^- sendo os *tilts* maior e menor mais próximos do *tilt* estimado, de acordo com as máscaras selecionadas em (4.2a) e (4.2b), respectivamente.

No caso excepcional em que não existe máscara com valor de *tilt* maior mais próximo ou menor mais próximo que o *tilt* estimado para o sinal de entrada (em outras palavras, caso uma das máscaras representadas em (4.2a) e (4.2b) não exista), apenas a máscara existente é selecionada, seguindo assim o mesmo fluxo representado em (4.1) e (5.1).

Vale apontar que a implementação da técnica TIP da literatura realizada neste trabalho, utilizada também em (5.1), (5.2a) e (5.2b) da técnica TIP-*Tilt*, não faz uso da função *Gain Matching*, após observações em [de Andrade Barboza et al., 2021] de que a correção de ganho computada pelo algoritmo afeta negativamente o desempenho da técnica ao ser aplicada no cenário de máscaras usado neste trabalho e no trabalho citado.

3.2 Configuração experimental

Esta seção descreve as ferramentas utilizadas na implementação dos modelos abordados neste trabalho e dos testes neles realizados. Apresenta ainda as máscaras de caracterização utilizadas nos experimentos, bem como as etapas de pré-processamento desses dados e do treinamento e teste das técnicas implementados.

3.2.1 Implementação

Todo o experimento foi executado com a linguagem de programação Python ¹, em conjunto com o *framework* TensorFlow ² e sua API Keras ³, sendo ambas ferramentas bem estabelecidas e validadas na construção de modelos de aprendizagem de máquina. Em relação à estruturação dos dados e aos cálculos matemáticos neles realizados, foi utilizada a biblioteca NumPy ⁴, além da biblioteca Matplotlib ⁵ para apresentação gráfica dos resultados exibidos no Capítulo 4.

¹<https://www.python.org/>

²<https://www.tensorflow.org/?hl=pt-br>

³<https://keras.io/>

⁴<https://numpy.org/>

⁵<https://matplotlib.org/>

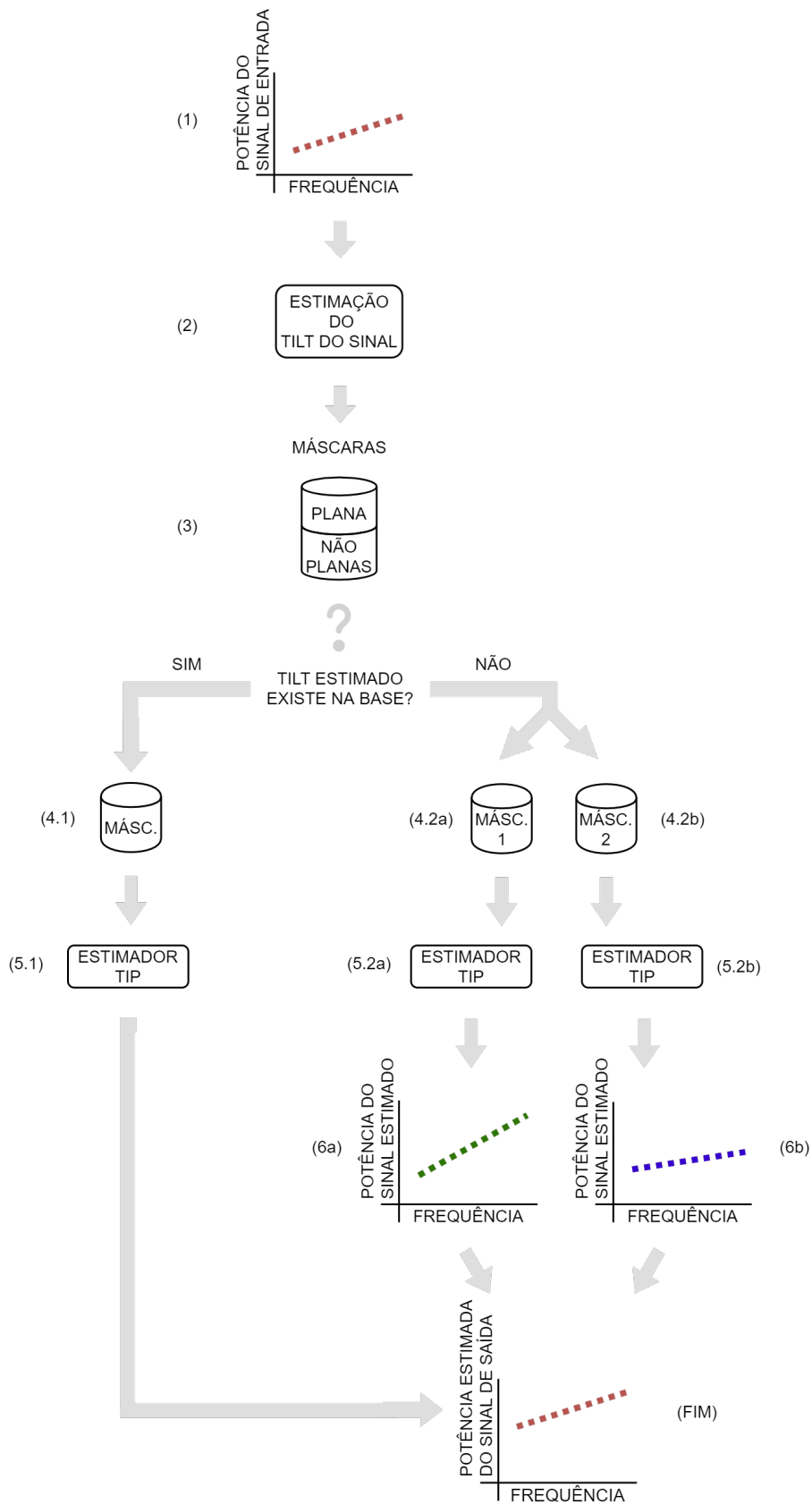


Figura 3.1: Fluxo de execução da técnica TIP-Tilt proposta neste trabalho. (Fonte: autor.)

3.2.2 Pré-processamento dos dados

Durante o estudo foram utilizados dois amplificadores ópticos comerciais, chamados neste trabalho de *EDFA1* e *EDFA2*, e sendo eles amplificadores *EDFA* de um e dois estágios, respectivamente. Ambos os amplificadores foram utilizados em simulações de laboratório para a realização de suas caracterizações com sinais ópticos distribuídos em 40 canais de frequências, indo de $192,1\text{THz}$ a $196,0\text{THz}$ em passos de 100GHz , de acordo com as técnicas apresentadas na Seção 2.3.1 e com a adaptação proposta na Seção 3.1. Dessa forma, foram criadas 29 máscaras de potência para o amplificador *EDFA1* e 7 máscaras de potência para o *EDFA2*, sendo, para ambos os conjuntos, uma máscara de sinais planos e as demais de sinais com *tilt*, separadas de acordo com o valor do mesmo. O amplificador *EDFA1* foi caracterizado com 7337 sinais ópticos, englobando sinais planos e sinais com *tilt* variando entre 1dB e 14dB em passos de 1dB , bem como seus respectivos simétricos negativos. Já o amplificador *EDFA2* foi caracterizado com 1771 sinais ópticos, também englobando sinais planos e sinais com valores de *tilt* de 2dB , 5dB e 8dB , além de seus respectivos simétricos negativos. Em ambos os amplificadores, cada máscara é composta por 253 sinais ópticos.

A etapa de pré-processamento dos dados resultantes da simulação se iniciou com a captura dos atributos relevantes aos modelos abordados no estudo, sendo eles o valor referente ao ganho de potência desejado, os 40 valores referentes à potência de entrada em cada canal de frequência, 40 valores referentes à potência de saída também para cada canal de frequência, e por fim a medida de *tilt* do sinal, totalizando assim 82 valores capturados para cada sinal nas máscaras dos amplificadores. Os valores de ganho e *tilt* são representados em *dB*, enquanto os valores de potência de entrada e saída são representados em *dBm*.

Para cada amplificador, os sinais de suas máscaras foram aleatoriamente distribuídos em 5 grupos de tamanhos semelhantes, de maneira a tornar possível a utilização da técnica de validação cruzada *K-Fold*. O pré-processamento foi finalizado com a normalização dos dados dentro do intervalo $[0,15; 0,85]$. Este intervalo foi escolhido por estar próximo da região linear da função sigmoide, evitando assim obter valores de fronteira no caso específico de uso do modelo *Spectrum-Tilt*.

3.2.3 Treinamento e teste

Em todas as técnicas e para os dados de ambos os amplificadores, a fase de treinamento utilizou 4 dos 5 grupos (ou “*folds*”), sendo o grupo restante utilizado na fase de teste, garantindo assim que os dados usados em uma fase nunca fossem utilizados também na outra. Esse processo foi repetido 5 vezes com grupos alternados, seguindo a estratégia do *K-Fold* e possibilitando que cada grupo fosse utilizado uma vez no teste, numa tentativa de garantir a consistência dos resultados apresentados. Feito isso, seguiu-se com a execução

dos algoritmos.

Para a técnica TIP da literatura e para a TIP-*Tilt* proposta neste trabalho, o treinamento consiste na construção de suas respectivas bases de consulta de máscaras, composta apenas por sinais planos no caso do algoritmo original, e por sinais planos e não planos no caso da adaptação, conforme descrito nas Seções 2.3.1 e 3.1.

Já em relação ao modelo *Spectrum-Tilt*, o treinamento foi feito com o otimizador *Adam*, usando como função de perda o erro quadrático médio (*mean squared error*). Foi definido um número máximo de épocas de 5000, com uma configuração adicional de parada precoce (*early stopping*) para prevenir o sobreajuste (*overfitting*) dos dados, que interrompe o treinamento ao perceber uma estabilização do erro de validação, tentando assim garantir uma boa capacidade de generalização no modelo. É válido dizer que os parâmetros definidos para o modelo *Spectrum-Tilt* neste trabalho foram os mesmos utilizados em [de Andrade Barboza et al., 2021], de maneira a tentar assegurar o desempenho apresentado na literatura.

3.3 Métricas de avaliação

Duas métricas de avaliação foram utilizadas: o erro absoluto médio e o erro absoluto máximo. O erro absoluto é calculado pela diferença absoluta entre a potência de saída prevista pelas técnicas e a potência de saída real do sinal óptico de entrada presente nas máscaras de potência, para cada um dos 40 canais de frequência. Dessa forma, para cada sinal de saída, o erro absoluto médio é dado pela soma do erro absoluto nos canais, dividido pela quantidade de canais. Já o erro absoluto máximo é dado pelo maior erro absoluto calculado para o sinal de saída, considerando todos os canais de frequência.

Capítulo 4

Resultados

Este capítulo apresenta cenários de validação do funcionamento da técnica *TIP-Tilt*, além de uma avaliação comparativa entre os resultados obtidos nos amplificadores *EDFA1* e *EDFA2* para as técnicas *TIP* e *Spectrum-Tilt* propostas na literatura, em relação à *TIP-Tilt* proposta neste trabalho.

4.1 Validação do funcionamento da técnica *TIP-Tilt*

É possível ilustrar e validar o funcionamento da técnica *TIP-Tilt* considerando três cenários de atuação do algoritmo, com base em seu fluxo de execução apresentado na Figura 3.1. O primeiro cenário é composto por um sinal óptico de entrada cujo *tilt* estimado possui uma máscara de potência com sinais de *tilt* correspondente na base de consulta, conforme previsto na fase (4.1) da execução. O segundo cenário apresenta como entrada um sinal cujo *tilt* não possui uma máscara correspondente na base de consulta, existindo, porém, máscaras com sinais de *tilt* maior e menor que o mesmo, conforme as fases (4.2a) e (4.2b). Por fim, o terceiro cenário é também formado por um sinal de entrada com *tilt* sem máscara correspondente na base, e também sem uma das máscaras com sinais de *tilt* maior ou menor que o mesmo, representando o caso em que uma das máscaras das fases (4.2a) e (4.2b) não existe, conforme previsto na Seção 3.1. Os cenários foram implementados considerando as máscaras de potência do amplificador *EDFA1*, descritas na Seção 3.2.2.

A Figura 4.1 apresenta os sinais envolvidos na reprodução do cenário 1. Foi selecionado um sinal óptico de entrada com *tilt* de $7dB$, para um contexto de ganho desejado no amplificador de $17dB$ (Figura 4.1a). Como base de consulta foi utilizada a máscara de potência relativa aos sinais com *tilt* também de $7dB$, com a remoção do sinal utilizado como entrada proveniente desta máscara. O sinal estimado pela técnica apresentou, em relação ao sinal de saída real, um erro médio absoluto de $0,003dB$ e um erro máximo absoluto de $0,01dB$ (Figura 4.1b).

A Figura 4.2 exhibe os sinais que compõem o cenário 2. O sinal de entrada selecionado

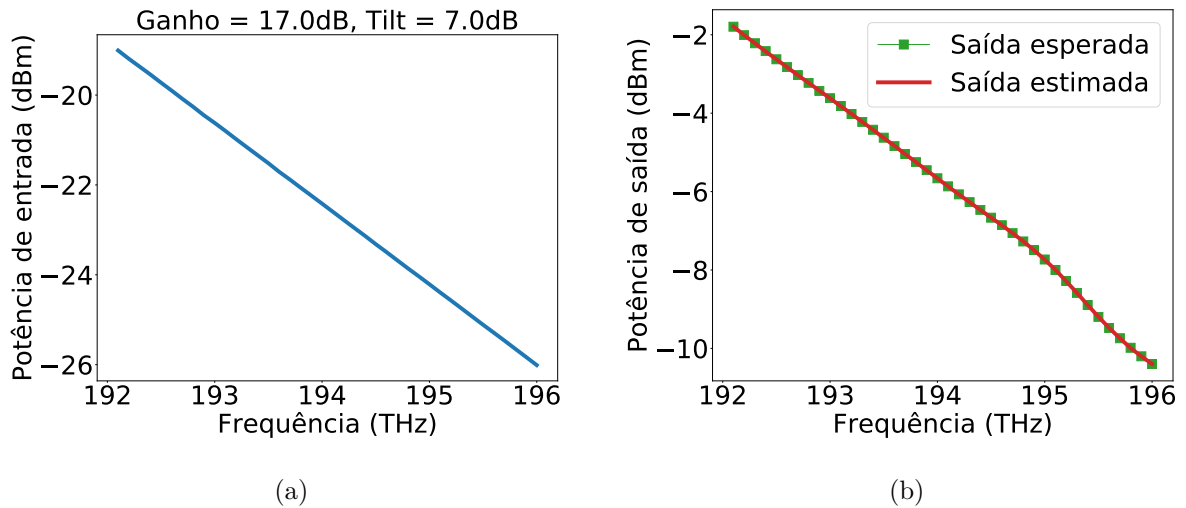


Figura 4.1: Sinal óptico de entrada (a) do cenário 1, com seu sinal óptico de saída e sua respectiva estimativa pela técnica TIP-tilt (b).

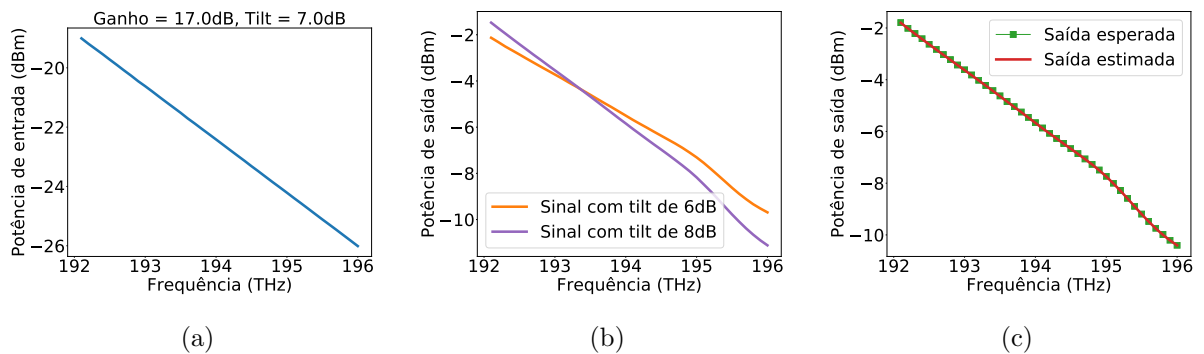


Figura 4.2: Sinal óptico de entrada (a) do cenário 2, com os sinais retornados pelas duas instâncias do estimador TIP original (b), além do sinal óptico real de saída e sua respectiva estimativa pela técnica TIP-tilt (c).

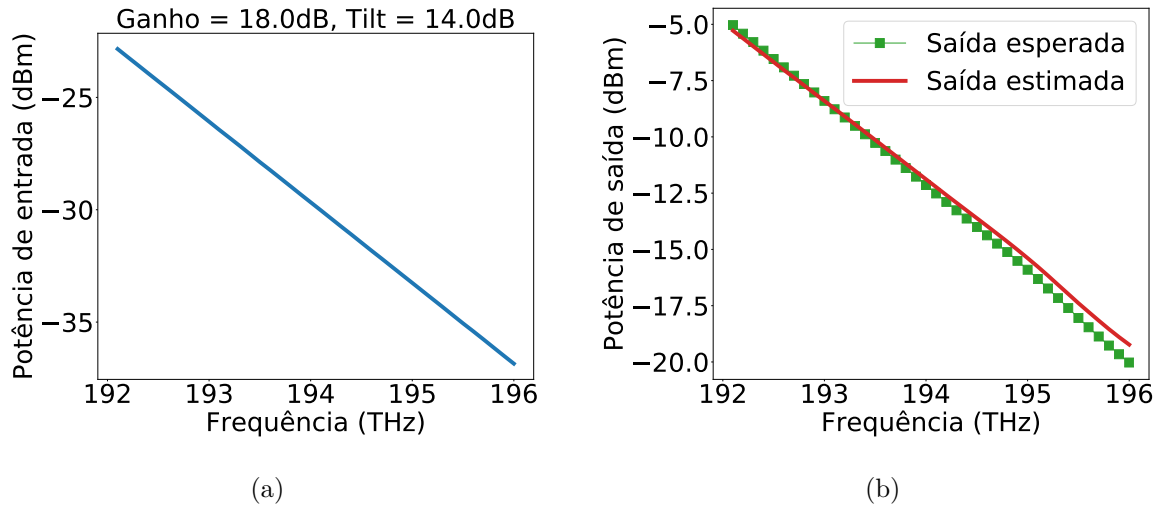


Figura 4.3: Sinal óptico de entrada (a) do cenário 3, com seu sinal óptico de saída e sua respectiva estimativa pela técnica TIP-*tilt* (b).

foi o mesmo utilizado no cenário 1 (Figura 4.2a). A base de consulta agora é composta pelas máscaras de potência referentes aos sinais com *tilt* de 6dB e 8dB, de maneira que as instâncias do estimador TIP que as recebem como entrada retornam um sinal de saída cada (Figura 4.2b). O sinal estimado pela técnica com base nos sinais retornados pelas instâncias do TIP apresentou, em comparação ao sinal de saída real, um erro médio absoluto de 0,009dB e um erro máximo absoluto de 0,014dB (Figura 4.2c).

A Figura 4.3 apresenta os sinais atuantes no cenário 3. O sinal de entrada selecionado possui um *tilt* de 14dB, para um contexto de ganho desejado no amplificador de 18dB (Figura 4.3a). A base de consulta é composta apenas pela máscara de potência referente aos sinais com *tilt* de 13dB. O sinal estimado pela técnica apresentou um erro médio absoluto de 0,33dB e um erro máximo absoluto de 0,8dB (Figura 4.3b).

Os resultados retornados pelo estimador TIP-*Tilt* nos cenários de validação mostram que a técnica consegue boas aproximações em relação ao sinal óptico de saída real, mesmo em condições de ausência de certas máscaras de potência na base de consulta, como nos cenários 2 e 3, o que é possível pois as máscaras de potência caracterizadas com valores de *tilt* próximos não possuem grandes diferenças entre si. Isso indica que a adaptação proposta cumpre seu papel básico de estimativa do sinal de saída de amplificadores ópticos no contexto de sinais de entrada com *tilt*.

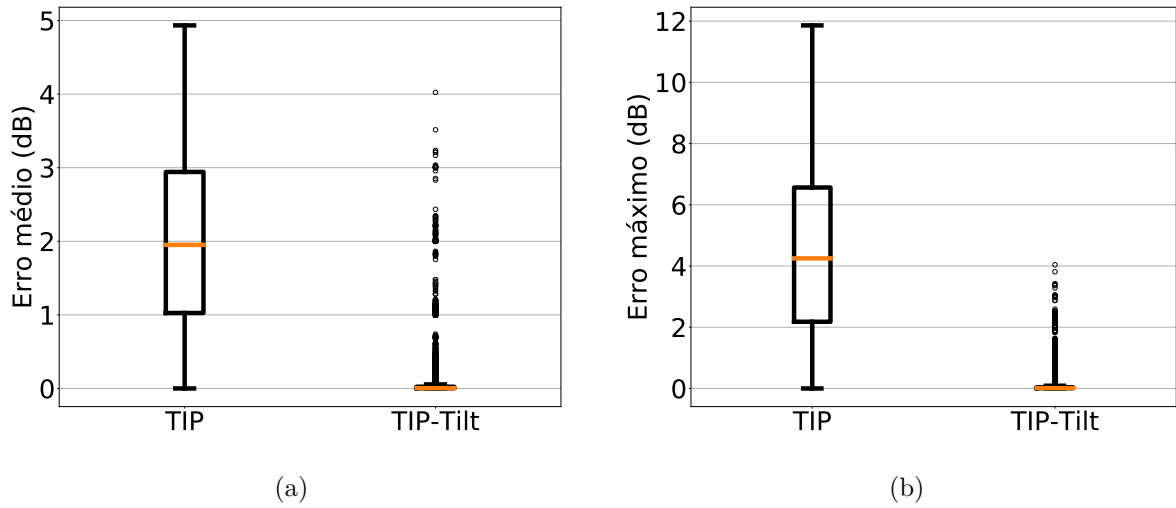


Figura 4.4: *Boxplots* da distribuição do erro médio (a) e máximo (b) de teste no amplificador *EDFA1*, considerando todos os *folds* nas técnicas TIP e TIP-Tilt.

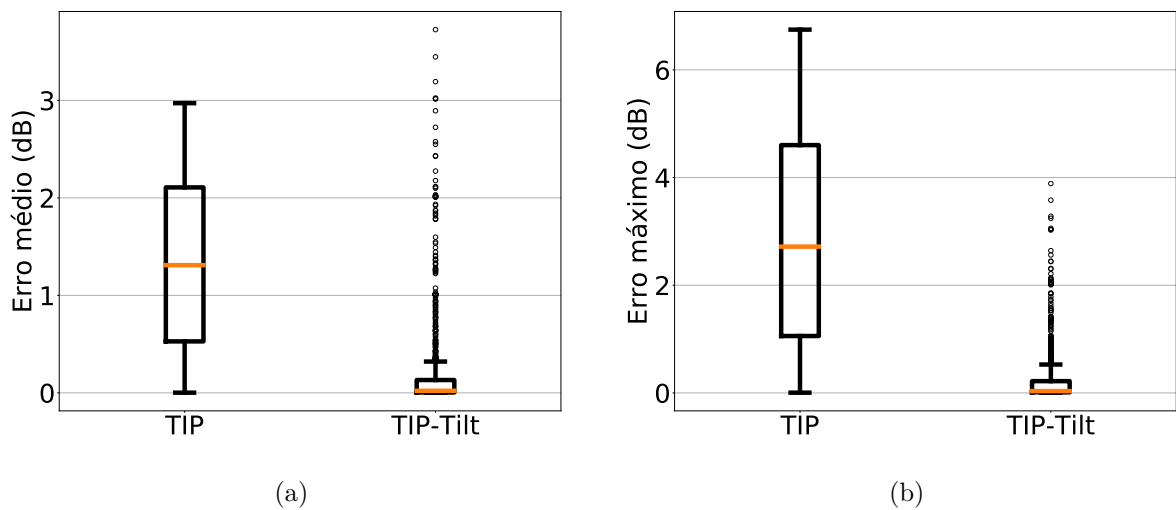


Figura 4.5: *Boxplots* da distribuição do erro médio (a) e máximo (b) de teste no amplificador *EDFA2*, considerando todos os *folds* nas técnicas TIP e TIP-Tilt.

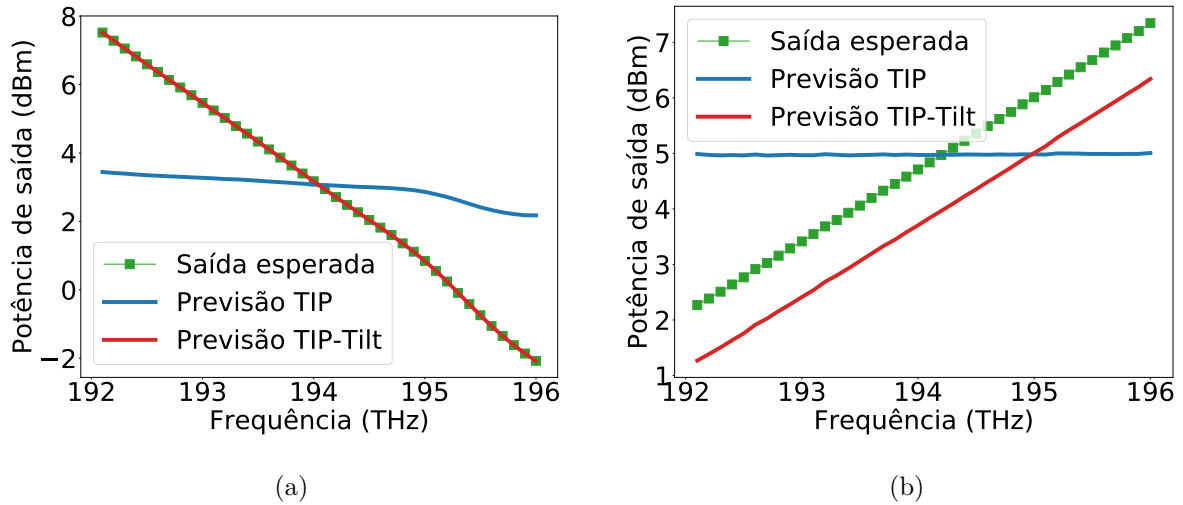


Figura 4.6: Estimação das técnicas TIP e TIP-Tilt do sinal que apresentou a mediana do erro máximo absoluto na técnica TIP, para o amplificador *EDFA1* (a) e *EDFA2* (b).

4.2 Avaliação comparativa entre as técnicas TIP e TIP-Tilt

A Figura 4.4 apresenta a distribuição dos erros médio e máximo absolutos para os resultados obtidos nos testes com as técnicas TIP original e TIP-Tilt proposta neste trabalho para o amplificador *EDFA1*. No caso do erro médio absoluto (Figura 4.4a), o estimador TIP apresentou uma mediana de $1,95\text{dB}$ e uma média de $1,98\text{dB}$, enquanto o TIP-Tilt apresentou uma mediana de $0,004\text{dB}$ e uma média de $0,16\text{dB}$. Já para o erro máximo absoluto (Figura 4.4b), o TIP apresentou uma mediana de $4,25\text{dB}$ e uma média de $4,43\text{dB}$, enquanto o TIP-Tilt apresentou uma mediana de $0,01\text{dB}$ e uma média de $0,19\text{dB}$.

A Figura 4.5 mostra os *boxplots* relativos aos erros médio e máximo absolutos para o amplificador *EDFA2*, considerando as mesmas técnicas da Figura 4.4. Para o erro médio absoluto (Figura 4.5a), o estimador TIP original apresentou uma mediana de $1,31\text{dB}$ e uma média de $1,18\text{dB}$, enquanto o TIP-Tilt apresentou uma mediana de $0,02\text{dB}$ e uma média de $0,18\text{dB}$. Considerando o erro máximo absoluto (Figura 4.5b), o TIP apresentou uma mediana de $2,72\text{dB}$ e uma média de $2,58\text{dB}$, enquanto o TIP-Tilt apresentou uma mediana de $0,03\text{dB}$ e uma média de $0,23\text{dB}$.

A Figura 4.6 apresenta um cenário comparativo de estimação de um sinal para as técnicas TIP e TIP-Tilt, de maneira que o sinal escolhido foi o que apresentou a mediana do erro máximo absoluto na técnica TIP em cada amplificador, sendo $4,25\text{dB}$ e $2,72\text{dB}$ para os amplificadores *EDFA1* (Figura 4.6a) e *EDFA2* (Figura 4.6b), respectivamente. Na estimação dos sinais, a técnica TIP-Tilt apresentou um erro máximo absoluto de $0,01\text{dB}$ e $1,01\text{dB}$ para os amplificadores *EDFA1* e *EDFA2*, respectivamente.

É possível perceber que a técnica TIP original apresenta distribuições de erro muito

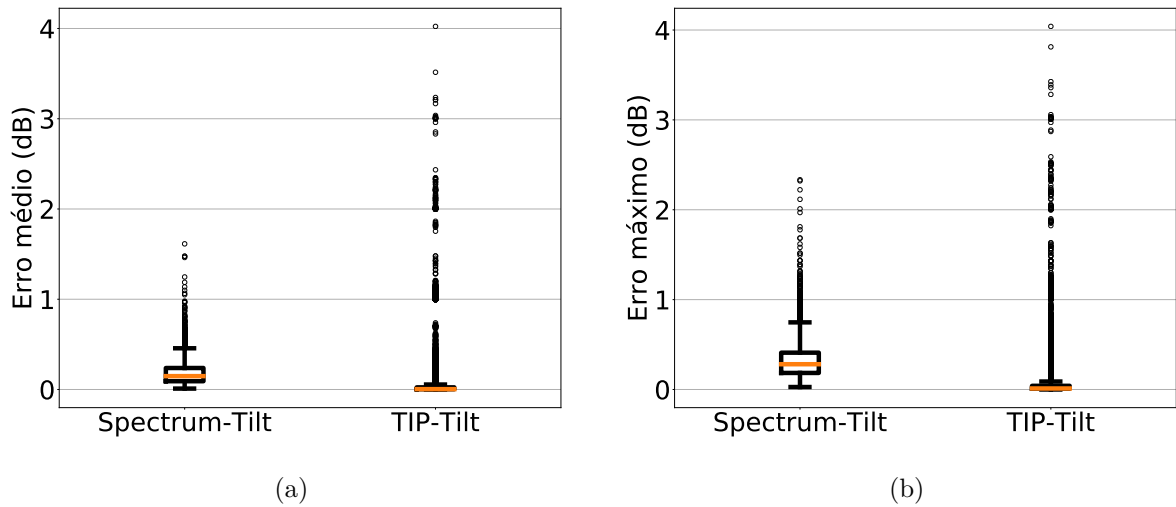


Figura 4.7: *Boxplots* da distribuição do erro de teste médio (a) e máximo (b) no amplificador *EDFA1*, considerando todos os *folds* no modelo *Spectrum-Tilt* e no estimador *TIP-Tilt*.

acima daquelas apresentadas pela técnica *TIP-Tilt* em ambos os amplificadores. Esse comportamento era esperado, visto que ele utiliza apenas a máscara plana na predição da potência de saída dos sinais. Por outro lado, o estimador *TIP-Tilt*, ao considerar a informação de *tilt* dos sinais de entrada, consegue uma aproximação consideravelmente maior que o estimador original, mostrando que as modificações foram efetivas na tarefa de tornar o *TIP* original mais robusto em relação à sinais não planos.

4.3 Avaliação comparativa entre o modelo *Spectrum-Tilt* e a técnica *TIP-Tilt*

A Figura 4.7 apresenta os *boxplots* referentes à distribuição dos erros médio e máximo absolutos no amplificador *EDFA1*, com base no modelo *Spectrum-Tilt* da literatura e no estimador *TIP-Tilt* proposto neste trabalho. Considerando que os resultados do *TIP-Tilt* foram apresentados na seção anterior, essa seção descreve apenas os resultados para o modelo *Spectrum-Tilt*. Para o erro médio absoluto (Figura 4.7a), o *Spectrum-Tilt* apresentou uma mediana de $0,15\text{dB}$ e uma média de $0,18\text{dB}$. Já para o erro máximo absoluto (Figura 4.7b), esse modelo apresentou uma mediana de $0,28\text{dB}$ e uma média de $0,33\text{dB}$.

A Figura 4.8 expõe a distribuição dos erros médio e máximo absolutos no amplificador *EDFA2*, novamente para o modelo *Spectrum-Tilt* e o estimador *TIP-Tilt*. Em relação aos resultados do erro médio absoluto (Figura 4.8a) para o modelo *Spectrum-Tilt*, observa-se uma mediana de $0,16\text{dB}$ e uma média de $0,2\text{dB}$. Já para o erro máximo absoluto (Figura 4.8b), observa-se uma mediana de $0,29\text{dB}$ e uma média de $0,31\text{dB}$.

A Figura 4.9 mostra um cenário de comparação da estimação de um sinal no modelo

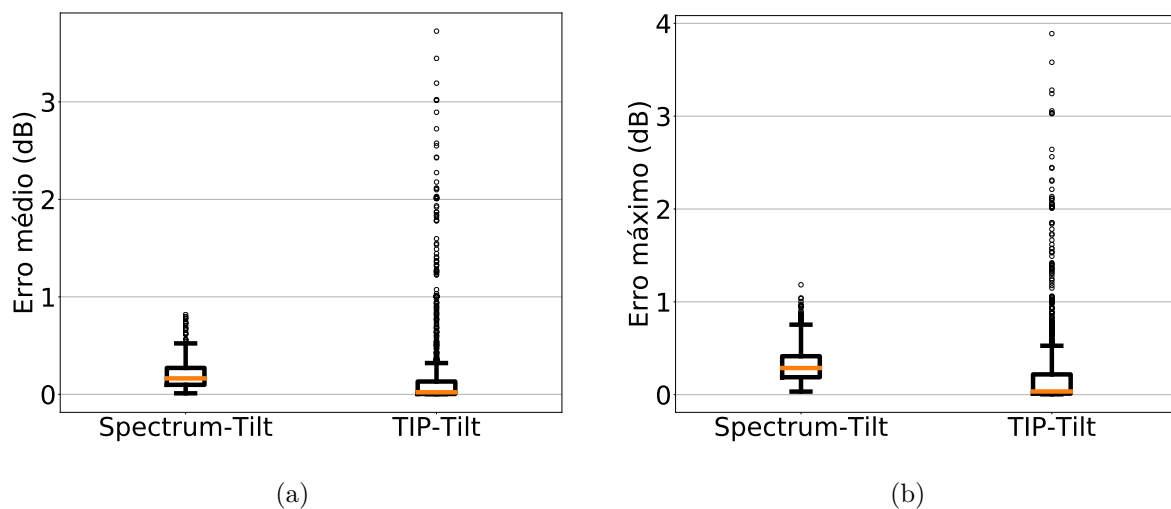


Figura 4.8: *Boxplots* da distribuição do erro de teste médio (a) e máximo (b) no amplificador *EDFA2*, considerando todos os *folds* no modelo *Spectrum-Tilt* e no estimador *TIP-Tilt*.

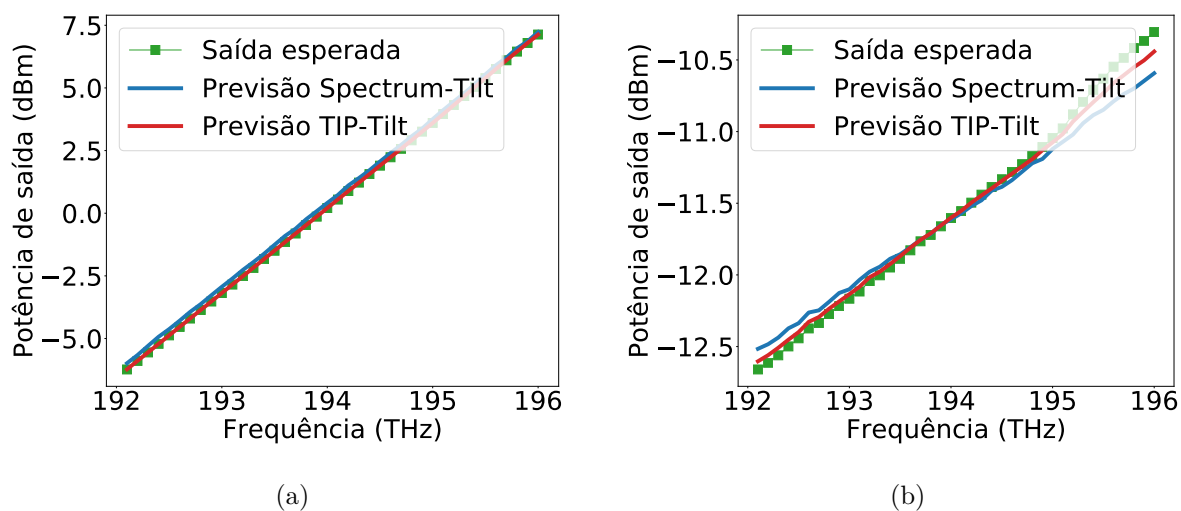


Figura 4.9: Estimação das técnicas *Spectrum-Tilt* e *TIP-Tilt* do sinal que apresentou a mediana do erro máximo absoluto no modelo *Spectrum-Tilt*, para o amplificador *EDFA1* (a) e *EDFA2* (b).

Spectrum-Tilt e na técnica *TIP-Tilt*, onde o sinal escolhido foi o que apresentou a mediana do erro máximo absoluto para o modelo *Spectrum-Tilt* em ambos os amplificadores, sendo $0,28dB$ e $0,29dB$ para os amplificadores *EDFA1* (Figura 4.9a) e *EDFA2* (Figura 4.9b), respectivamente. A técnica *TIP-Tilt* apresentou um erro máximo absoluto de $0,01dB$ e $0,14dB$ na estimação do sinal nos amplificadores *EDFA1* e *EDFA2*, respectivamente.

Apesar do estimador *TIP-Tilt* apresentar medianas e médias menores que o modelo *Spectrum-Tilt*, é possível notar a grande quantidade de *outliers* presentes em suas distribuições quando comparadas às distribuições do modelo baseado em RNA, o que pode indicar uma maior precisão deste último em relação ao primeiro. Ainda assim, é importante apontar que, em diversos casos, a técnica *TIP-Tilt* consegue uma aproximação maior do espectro real de saída dos sinais não planos, como evidenciado pelos primeiro e terceiro quartis das distribuições exibidas.

Capítulo 5

Conclusão

Neste trabalho foi apresentada uma adaptação da técnica da literatura TIP baseada em interpolação linear, sendo o seu desempenho comparado com aquele apresentado pela técnica original e com o do modelo *Spectrum-Tilt* baseado em RNA, também da literatura, na tarefa de predição do espectro de saída de sinais ópticos planos e não planos em amplificadores ópticos.

Os resultados expostos no Capítulo 4 demonstram que a técnica TIP-*Tilt*, ao considerar a informação de *tilt* dos sinais de entrada, alcançou um desempenho muito superior em relação ao estimador original, além de conseguir aproximações semelhantes e, por vezes, melhores que o modelo *Spectrum-Tilt*, considerando o uso de máscaras de caracterização de dois amplificadores ópticos comerciais *EDFA*. Com isso, é possível afirmar que o objetivo geral deste trabalho foi alcançado, visto que a técnica TIP da literatura foi satisfatoriamente aprimorada em cenários compostos por sinais ópticos com *tilt*. É esperado que o desenvolvimento de técnicas de predição do espectro de saída de amplificadores ópticos, como o realizado neste trabalho, contribua positivamente na resolução do problema ACOP.

Como trabalho futuro, é desejado realizar testes de predição com a técnica TIP-*Tilt* considerando quantidades menores de máscaras de caracterização em sua base de consulta, de maneira a diminuir a quantidade de dados armazenados e verificar o desempenho da técnica ao possuir menos informações sobre o amplificador. Além disso, deseja-se testar a eficiência da técnica em cenários de enlace, composto por uma cascata de amplificadores. Ainda, pretende-se realizar testes com dados de caracterização de outros modelos de amplificadores comerciais, com o objetivo de validar o desempenho da técnica em uma maior variedade de cenários.

Bibliografia

- [Barboza et al., 2017] Barboza, E., Bastos-Filho, C., Martins Filho, J., Silva, M., Coelho, L., Moura, U., and De Oliveira, J. (2017). Local and global approaches for the adaptive control of a cascade of amplifiers. *Photonic Network Communications*, 33.
- [Barboza et al., 2018] Barboza, E., Silva, M., Coelho, L., Bastos-Filho, C., and Martins Filho, J. (2018). Amplifier adaptive control of operating point considering non-linear interference. *IEEE Photonics Technology Letters*, 30:573–576.
- [Barboza, 2013] Barboza, E. A. (2013). Inteligência computacional aplicada ao projeto de amplificadores raman banda larga. Master’s thesis, Universidade de Pernambuco, Recife.
- [de Andrade Barboza, 2017] de Andrade Barboza, E. (2017). *Amplificadores Ópticos Autônomos: desenvolvimento e análise de técnicas*. PhD thesis, Universidade Federal de Pernambuco.
- [de Andrade Barboza et al., 2021] de Andrade Barboza, E., da Silva, A. A. B., Filho, J. C. P., da Silva, M. J., Bastos-Filho, C. J. A., and Martins-Filho, J. F. (2021). Optical amplifier response estimation considering non-flat input signals characterization based on artificial neural networks. *J. Lightwave Technol.*, 39(1):208–215.
- [de Andrade Barboza et al., 2019] de Andrade Barboza, E., da Silva, A. A. B., Pinheiro-Filho, J. C., and Filho, C. J. A. B. (2019). Rede neural artificial para estimativa precisa de sinal de saída em amplificadores ópticos. In Fernandes, B. J. T. and {Pereira Júnior}, A., editors, *Anais do 14 Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional*, pages 1–5, Curitiba, PR. ABRICOM.
- [Fei et al., 2015] Fei, Y., Fumagalli, A., Garrich, M., Sarti, B., Moura, U., González, N. G., and Oliveira, J. (2015). Estimating edfa output power with an efficient numerical modeling framework. In *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 5222–5227.
- [Harun et al., 2003] Harun, S. W., Tamchek, N., and Ahmad, H. (2003). Comparison of performances between two-stage and single-stage l-band edfa. *Journal of Optical Communications*, 24:211–213.

- [Index, 2017] Index, C. V. N. (2017). Cisco visual networking index: Forecast and methodology, 2016-2021. In *Complete Visual Networking Index (VNI) Forecast*, volume 12, pages 749–759.
- [Moura et al., 2012] Moura, U., De Oliveira, J., Amgarten, R., Paiva, G., and Oliveira, J. (2012). Caracterizador automatizado de máscara de potência de amplificadores Ópticos para redes wdm reconfiguráveis.
- [Movahedi et al., 2012] Movahedi, Z., Ayari, M., Langar, R., and Pujolle, G. (2012). A survey of autonomic network architectures and evaluation criteria. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 14(2):464–490.
- [Olsson, 1989] Olsson, N. A. (1989). Lightwave systems with optical amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, 7(7):1071–1082.
- [Winzer et al., 2018] Winzer, P. J., Neilson, D. T., and Chraplyvy, A. R. (2018). Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years. *Opt. Express*, 26(18):24190–24239.