

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**GIULIANO DOS SANTOS REBULI**

**OTIMIZAÇÃO ESPECTRAL DE UM LASER DE  
MÚLTIPLOS COMPRIMENTOS DE ONDA A PARTIR DO  
ESPALHAMENTO BRILLOUIN CASCATEADO**

VITÓRIA  
2021

GIULIANO DOS SANTOS REBULI

**OTIMIZAÇÃO ESPECTRAL DE UM LASER DE MÚLTIPLOS  
COMPRIMENTOS DE ONDA A PARTIR DO ESPALHAMENTO  
BRILLOUIN CAScateado**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Giuliano dos Santos Rebuli**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Schmidt Castellani  
Coorientadora: Enga. Eduarda Pedruzzi da Silva

VITÓRIA  
2021

GIULIANO DOS SANTOS REBULI

**OTIMIZAÇÃO ESPECTRAL DE UM LASER DE MÚLTIPLOS  
COMPRIMENTOS DE ONDA A PARTIR DO ESPALHAMENTO  
BRILLOUIN CASCATEADO**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Giuliano dos Santos Rebuli**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 12 de julho de 2021

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Carlos Eduardo S. Castellani**  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

---

**Enga. Eduarda Pedruzzi da Silva**  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Coorientadora

---

**Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto**  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador

---

**Prof. Dr. Helder R. de Oliveira Rocha**  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao professor Carlos Eduardo e à Eduarda pelas orientações, direcionamentos e conhecimento passado até aqui, sem dúvidas foram fundamentais para a boa execução do projeto.

À minha família e amigos, pelo apoio e compreensão durante todo o desenvolvimento do trabalho, compartilhando suas experiências.

À minha noiva, Samira, que por tantas vezes amorosamente ouviu minhas queixas e me acalmou quando alguma coisa não funcionava bem. É um enorme prazer poder dividir a vida com você.

Por último – e o mais importante – a Deus, por me conceder sabedoria e capacidade de lidar com os problemas, e por estar presente em todo tempo.

## RESUMO

Este trabalho é um projeto de pesquisa para a otimização de um laser Brillouin de múltiplos comprimentos de onda, no que tange à quantidade de comprimentos de ondas gerados pelo espalhamento Brillouin cascadeado. Uma aplicabilidade de lasers de múltiplos comprimentos de onda é a possibilidade de uso de vários canais de comunicação – um para cada comprimento de onda - em um único laser, diminuindo custos comparados a lasers de um único comprimento de onda. Uma vantagem do modelo simulado é poder prever comportamentos em diversas situações, possibilitando a análise prévia sem a necessidade dos materiais de forma física que podem ser impraticáveis. O projeto usa um modelo de propagação de um laser em fibra na presença do espalhamento Brillouin, que é baseado em uma solução analítica adaptada para atender às necessidades do mesmo e para redução do tempo de processamento. A otimização é feita através de uma busca exaustiva, considerando que o modelo é analítico e tem uma resposta relativamente rápida. O resultado da pesquisa apresenta como melhores soluções duas configurações do laser com 75 diferentes comprimentos de onda, além de uma terceira configuração com 68 comprimentos de onda cujas potências estão numa margem de 3 dB entre si. Com os resultados obtidos, o projeto traz uma solução para otimização de diversos instrumentos ópticos que são baseados no fenômeno óptico em estudo – o espalhamento Brillouin.

Palavras-chave: Espalhamento Brillouin. Otimização. Solução analítica. Planicidade espectral.

## **ABSTRACT**

This essay is a research project for the optimization of a multiwavelength Brillouin laser, in concern of the quantity of wavelengths generated by the cascaded Brillouin scattering. A great applicability of multiwavelength lasers is the possibility of the use of several communication channels – one for each wavelength – in a single laser, lowering costs compared to single-wavelengths lasers. An advantage of the simulated model is to predict behaviors in many situations, allowing a previous analysis without the necessity of physical material that may be impracticable. The project uses an analytical based propagation model of a fiber laser in the presence of the Brillouin scattering, adapted to attend the necessities of this project and to reduce the processing time. The optimization is done by an exhaustive search, considering that the model is analytical and has a relatively small response time. The research's presents as its best result two lasers' configurations with 75 different wavelengths, besides a third configuration with 68 wavelengths whose powers are in a threshold of 3 dB within each other. With the obtained results, the project brings a solution to the optimization of several optical instruments that are based on the optical phenomenon in study – the Brillouin scattering.

Keywords: Brillouin Scattering. Optimization. Analytical solution. Spectral planicity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de energias no SBS.....	12
Figura 2 – Laser Brillouin de um único comprimento de onda.....	18
Figura 3 – Espectro de um laser Brillouin de um único comprimento de onda .....	19
Figura 4 – Laser Brillouin em fibra com múltiplos comprimentos de onda.....	19
Figura 5 – Espectro de um laser Brillouin de múltiplos comprimentos de onda.....	20
Figura 6 – Comparação entre o resultado da solução analítica e a resposta colhida experimentalmente .....	28
Figura 7 – Comparação: dados experimentais e solução analítica com a inclusão da saturação do EDFA .....	29
Figura 8 – Curva da relação do ganho do EDFA com a potência de entrada.....	30
Figura 9 – Resultado da busca principal – configuração 1 .....	37
Figura 10 – Resultado da busca principal – configuração 2.....	37
Figura 11 – Comprimentos de onda máximos relacionados ao Acoplador 1 .....	39
Figura 12 – Comprimentos de onda máximos relacionados ao Acoplador 2.....	40
Figura 13 – Comprimentos de onda máximos relacionados ao tamanho da fibra.....	41
Figura 14 – Comprimentos de onda máximos relacionados à potência de entrada.....	42
Figura 15 – Comprimentos de onda máximos relacionados aos acopladores .....	43
Figura 16 – Mapa de cores - acopladores .....	43
Figura 17 – Resultado da busca pela planicidade espectral.....	44
Figura 18 – Limiares para planicidade espectral .....	45
Figura 19 – Erro tipo 1 - Antes.....	49
Figura 20 – Erro tipo 1 - Depois.....	50
Figura 21 – Erro tipo 2 - Antes.....	50
Figura 22 – Erro tipo 2 - Depois.....	51
Figura 23 – Erro tipo 3 - Antes.....	51
Figura 24 – Erro tipo 3 - Depois.....	52
Figura 25 – Erro tipo 4 - Antes.....	52
Figura 26 – Erro tipo 4 - Depois.....	53
Figura 27 – Erro tipo 5 - Antes.....	53
Figura 28 – Erro tipo 5 - Depois.....	54
Figura 29 – Erro tipo 6 - Antes.....	54
Figura 30 – Erro tipo 6 - Depois.....	55

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Transição de regimes no modelo analítico .....	24
Quadro 2 – Configurações dos resultados da otimização .....	36



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BFA	<i>Brillouin Fiber Amplifier</i> (Amplificador Brillouin em Fibra)
BFL	<i>Brillouin Fiber Laser</i> (Laser Brillouin em Fibra)
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> (Amplificador a Fibra Dopada com Érbio)
LabTel	Laboratório de Telecomunicações da Ufes
NaN	<i>Not a Number</i> (Não é um número)
NZDSF	<i>Non-Zero Dispersion Shifted Fiber</i> (Fibra com Dispersão Deslocada Não-Zero)
OSA	<i>Optical Spectrum Analyzer</i> (Analisador de Espectro Óptico)
SBS	<i>Stimulated Brillouin Scattering</i> (Espalhamento Brillouin Estimulado)
SBST	<i>Stimulated Brillouin Scattering Threshold</i> (Limiar de potência do Espalhamento Brillouin Estimulado)
TLS	<i>Tunable Laser Source</i> (Fonte de Laser Ajustável)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1</b>	<b>Laser Brillouin de um Único Comprimento de Onda .....</b>	<b>18</b>
<b>3.2</b>	<b>Laser Brillouin de Múltiplos Comprimentos de Onda.....</b>	<b>19</b>
<b>3.3</b>	<b>Otimização da Quantidade de Comprimentos de Onda .....</b>	<b>21</b>
<b>3.4</b>	<b>Encontrando a Planicidade Espectral.....</b>	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>23</b>
<b>4.1</b>	<b>Metodologia .....</b>	<b>23</b>
<b>4.2</b>	<b>Solução Analítica.....</b>	<b>23</b>
<b>4.3</b>	<b>Reconstrução Gráfica do Sinal .....</b>	<b>27</b>
<b>4.4</b>	<b>Saturação do Amplificador Óptico .....</b>	<b>28</b>
<b>4.5</b>	<b>Parâmetros Utilizados .....</b>	<b>30</b>
<b>4.6</b>	<b>Simulação e Busca.....</b>	<b>31</b>
4.6.1	Detecção de erros.....	32
4.6.2	Tratamento de erros .....	34
4.6.3	Maior número de comprimentos de onda .....	34
4.6.4	Maior número de comprimentos de onda para cada parâmetro.....	35
4.6.5	Planicidade espectral.....	35
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>36</b>
<b>5.1</b>	<b>Busca Geral .....</b>	<b>36</b>
<b>5.2</b>	<b>Erros Encontrados.....</b>	<b>38</b>
<b>5.3</b>	<b>Busca em Cada Parâmetro.....</b>	<b>38</b>
5.3.1	Acoplador 1.....	39
5.3.2	Acoplador 2.....	40
5.3.3	Comprimento da fibra.....	41
5.3.4	Potência de entrada .....	42
5.3.5	Acopladores 1 e 2 em conjunto.....	42

<b>5.4</b>	<b>Busca pela Planicidade Espectral.....</b>	<b>44</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>46</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>47</b>
	<b>APÊNDICE A – EFEITO DO TRATAMENTO DE ERROS.....</b>	<b>49</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Espalhamento Brillouin é um efeito descoberto na década de 20 por Léon Brillouin que descreve interações da luz com o meio material em que ela se propaga (BRILLOUIN, 1922). Tal efeito ocorre de forma natural quando a luz sofre variação de energia ao interagir com o material, resultando no que é chamado de desvio de Brillouin, uma alteração na frequência da onda (AGRAWAL, 2013). Essa disparidade de frequência provou ser útil em diversas aplicações ópticas.

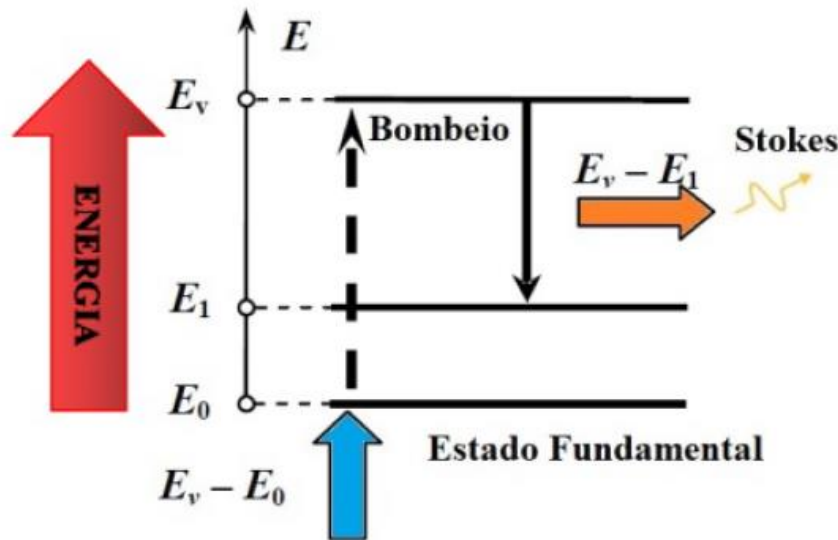
O Espalhamento Brillouin Estimulado (SBS, do inglês *Stimulated Brillouin Scattering*) foi observado em 1964 (CHIAO; TOWNES; STOICHEFF, 1964) com a utilização da tecnologia de lasers, que permite obter feixes ópticos com elevadíssima densidade de potência (TANG, 1966). Desde então diversos pesquisadores têm usado seus resultados, aplicando a descoberta à tecnologia de fibras óticas, trazendo novas possibilidades em áreas diversas, como sensoriamento (BAO; CHEN, 2011; BOLOGNINI et al., 2019) e medicina (YAKOVLEV et al., 2016).

O processo físico envolvido no SBS se dá pela interação do sinal de entrada (laser de bombeio) com o material e se o fóton tiver energia o suficiente, há uma troca de energia. O fóton incidente, então, perde energia e é agora chamado um fóton de Stokes, que possui uma frequência menor e é caracterizado por ser contrapropagante, ou seja, ele é gerado no sentido oposto ao sentido do laser de bombeio. Nesse mesmo instante, é criado um fônon acústico que também é resultado da interação do bombeio com o material. O fônon acústico é uma quase-partícula que designa um *quantum* de uma vibração em uma estrutura cristalina.

Como a energia deve ser conservada durante o espalhamento, a energia do fônon deve ser exatamente a energia perdida pelo fóton do bombeio (AGRAWAL, 2013). A Figura 1 ilustra com um diagrama esse esquema de potência.

Vendo esse processo do ponto de vista da mecânica quântica, a aniquilação de um fóton do bombeio cria um fóton de Stokes e um fônon acústico simultaneamente (AGRAWAL, 2013).

Figura 1 – Diagrama de energias no SBS



Fonte: Silva (2020).

Nota: Adaptado pelo autor.

O espalhamento como um todo pode ser facilmente iterado, gerando no final um laser de múltiplos comprimentos de onda. Uma grande aplicabilidade do laser de múltiplos comprimentos de onda é em telecomunicações. Em sistemas de comunicação, é muito importante que não haja interferência entre os canais em que há a troca de dados; essa não-interferência é relativamente simples de ser atingida quando cada canal tem a sua própria frequência de comunicação com um espaçamento entre elas. É comum nesses sistemas a utilização de muitos comprimentos de onda de uma só vez, respeitando esse espaço de não-interferência. Sendo assim, sistemas que antes requereriam diversos lasers de um único comprimento de onda agora podem utilizar do SBS em um único laser de múltiplos comprimentos de onda.

Essa diminuição na quantidade de lasers em decorrência do cascadeamento do SBS traz benefícios, como a redução de custos pela menor quantidade de laser necessária e a maior simplicidade dos *hardwares* de aparelhos emissores e receptores.

O processo de geração de múltiplos comprimentos de onda é chamado de cascadeamento, e uma das formas de alcançar isso é por meio de uma realimentação no circuito óptico, fazendo o uso de conectores para possibilitar a medição de múltiplos comprimentos de onda. Tais configurações de realimentação serão mostradas e discutidas adiante na seção 3.2.

Para poder fazer a otimização do número de comprimentos de onda gerados no cascadeamento, é necessário alterar os parâmetros diversas vezes para entender como a dinâmica desse processo reage às mudanças da configuração do laser. Isso só é possível em larga escala se o processo for rápido e fácil de ser alterado.

Tendo isso em vista, a pergunta de pesquisa, então, que esse trabalho se propõe a responder é: Qual o conjunto de parâmetros de um laser Brillouin que gera a maior quantidade de ondas? A solução adotada foi o uso de um modelo de propagação do laser na fibra que é baseado numa solução analítica da evolução espacial do bombeio na fibra, desenvolvido por Silva e outros (2020). Assim, um computador pode rodar milhões de casos em algumas horas e facilita a análise de como o resultado varia com as mudanças de parâmetros do laser. A solução analítica e seu funcionamento é discutida na seção 4.1

A forma escolhida para a otimização foi a da busca exaustiva, que determina uma região de busca com uma quantidade de casos e testa todas as possibilidades para no final ver qual resultado foi o mais satisfatório. Esse método foi escolhido por ser o mais simples de ser implementado. As implementações da busca e da propagação do laser foram feitas em MATLAB.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral desse projeto é encontrar os parâmetros de laser Brillouin de múltiplos comprimentos de onda de modo que a configuração do laser entregue o maior número possível de ondas Stokes geradas numa fibra óptica através do espalhamento de Brillouin estimulado, com a maior equidade na distribuição de potência entre os novos comprimentos de onda gerados, dadas condições da fibra, como seu comprimento, atenuação ao longo da fibra, tipo de fibra utilizado, potência do sinal de entrada etc.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos têm como função guiar o desenvolvimento do projeto desde seu início até a sua conclusão, sempre contribuindo para alcançar o objetivo geral. São eles:

- Obter um modelo iterativo que descreve a propagação da onda e considera parâmetros reais de um amplificador óptico;
- Atingir, em simulação, a otimização do espalhamento, sendo o ótimo definido por a maior quantidade de ondas Stokes em conjunto com a obtenção de potências similares nos múltiplos comprimentos de onda do laser (planicidade espectral);
- Determinar a influência de cada parâmetro no resultado final.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

O SBS se manifesta através da geração de uma onda Stokes<sup>1</sup> cuja frequência é menor do que a da onda incidente por uma quantidade descrita pelo meio não-linear. Esse efeito acontece de modo contrapropagante em fibras monomodo e tem sua frequência diminuída. De acordo com Agrawal (2013, p. 354, tradução nossa):

O processo do SBS pode ser descrito classicamente como uma interação não-linear entre o bombeio e campos de Stokes e uma onda acústica (inicialmente gerada termicamente) através do processo de eletrostrição<sup>2</sup>. A onda acústica produz modulações de densidade que por sua vez modula o índice de refração do meio. Essa grade de índices induzida pelo bombeio espalha a luz do bombeio através da difração de Bragg. A luz espalhada tem sua frequência reduzida por causa do efeito Doppler associado com o movimento dessa grade com uma velocidade acústica.

Esse espalhamento tem uma energia menor (Figura 1) e, portanto, tem uma variação na frequência. Como tanto a energia quanto o momento deve ser conservado durante cada espalhamento, as frequências e os vetores de onda das três ondas são relacionados por (1).

$$\Omega_B = \omega_p - \omega_s, \quad \mathbf{k}_A = \mathbf{k}_p - \mathbf{k}_s \quad (1)$$

Onde  $\omega_p$  e  $\omega_s$  são as frequências e  $\mathbf{k}_p$  e  $\mathbf{k}_s$  são os vetores de onda, do bombeio e da onda de Stokes, respectivamente. A frequência  $\Omega_B$  e o vetor de onda  $\mathbf{k}_A$  da onda acústica satisfazem a relação de dispersão normal em (2).

$$\Omega_B = v_A |\mathbf{k}_A| \approx 2v_A |\mathbf{k}_p| \sin(\theta/2) \quad (2)$$

Onde  $\theta$  é o ângulo entre o bombeio e o campo de Stokes.

A equação (2) mostra que o desvio de frequência da onda Stokes depende do ângulo do espalhamento. Particularmente,  $\Omega_B$  é máximo na direção oposta, ou seja,  $\theta = \pi$ , e é nulo quando

<sup>1</sup> É chamada de onda Stokes a onda resultante da interação da luz com o meio em que ela se propaga; no caso de um espalhamento Brillouin, ela é uma onda de menor frequência que se propaga no sentido oposto ao da onda de bombeio.

<sup>2</sup> Eletrostrição é a deformação elástica produzida num dielétrico sólido quando sobre este age um campo elétrico.



$\theta = 0$ . Numa fibra monomodo, as únicas direções relevantes são a direta e reversa; por isso, o SBS só ocorre na direção reversa, com o desvio de Brillouin definido por (3).

$$\mathbf{v}_B = \Omega_B/2\pi = 2n_p v_A/\lambda_p \quad (3)$$

Aqui, a equação (2) foi utilizada com  $|\mathbf{k}_p| = 2\pi n_p/\lambda_p$  e  $n_p$  é o índice de refração efetivo. Por exemplo, para fibras de sílica, utilizando  $n_p = 1,45$  e  $v_A = 5,96$  km/s, tem-se  $v_B = 11,1$  GHz para  $\lambda_p = 1550$  nm.

Em uma outra aplicação, Kurashima, Horiguchi e Tateda (1990) concluíram que esse desvio de frequência de Brillouin varia de acordo com a temperatura em que a fibra está exposta, tendo assim um sensor óptico que mostra a variação da temperatura do meio onde a fibra está inserida.

O crescimento das ondas Stokes é caracterizado pelo espectro do ganho de Brillouin  $g_B(\Omega)$  com pico em  $\Omega_B$ . Entretanto, a largura de banda do espectro de ganho é pequena – aproximadamente 10 MHz – porque está relacionada com o tempo de atenuação das ondas acústicas relacionadas ao tempo de vida do fônon. O ganho tem um espectro da forma mostrada na equação (4).

$$g_B(\Omega) = \frac{g_p \cdot (\Gamma_B/2)^2}{(\Omega - \Omega_B) + (\Gamma_B/2)^2} \quad (4)$$

O valor de pico do ganho de Brillouin em  $\Omega = \Omega_B$  é dado pela equação (5).

$$g_p \equiv g_B(\Omega_B) = \frac{4\pi^2 \gamma_e^2 f_A}{n_p c \lambda_p^2 \rho_0 v_A \Gamma_B} \quad (5)$$

Onde  $\rho_0$  é a densidade do material,  $\gamma_e$  é a constante eletroestrutiva,  $\Gamma_B$  é a frequência angular da largura de linha Brillouin e  $f_A$  é a fração pela qual o ganho do SBS é reduzido se os modos acústicos e ópticos não se sobrepõem completamente dentro da fibra (AGRAWAL, 2013).

Sob regime estacionário, o SBS é governado por duas equações diferenciais conjuntas descritas em (6) e (7):

$$\frac{dI_p}{dz} = g_B I_p I_s - \alpha I_p \quad (6)$$

$$-\frac{dI_S}{dz} = g_B I_P I_S - \alpha I_S \quad (7)$$

onde  $I_p$  é a intensidade do bombeio,  $I_s$  a intensidade da componente Stokes e  $\alpha$  a perda na fibra.

Na ausência de perdas na fibra ( $\alpha = 0$ ) as equações mostram que  $\frac{d}{dz}(I_p - I_s) = 0$ , ou seja,  $(I_p - I_s)$  permanece constante ao longo da fibra.

Essas duas equações são especialmente importantes porque a solução analítica desenvolvida por Gökhan e Göktaş (2019) usa a teoria da perturbação para simular justamente a resposta de (6) e (7), que nesse formato não têm uma solução analítica exata e são muitas vezes resolvidas com o uso de métodos numéricos.

Usando  $I_p(z) = I_p(0)e^{-\alpha z}$  na equação (7) e integrando ao longo do comprimento L da fibra, a intensidade da componente Stokes cresce exponencialmente na direção reversa, como visto em (8).

$$I_s(0) = I_s(L) \exp(g_B P_0 L_{eff} / A_{eff} - \alpha L) \quad (8)$$

Onde  $P_0 = I_p(0)A_{eff}$  sendo a potência do bombeio na entrada,  $A_{eff}$  é a área efetiva do modo e  $L_{eff}$  é o comprimento efetivo da fibra, dado por (9):

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (9)$$

Por ser um efeito majoritariamente contrapropagante, ou seja, a maior parte das ondas Stokes são geradas no sentido oposto ao bombeio, apenas lançar o bombeio numa fibra não é o suficiente, já que sem a realimentação, o sinal continua seu caminho após a fibra e não se tem mais o espalhamento no local em estudo; se faz necessário, então, a utilização de diferentes configurações para aproveitar ao máximo a variação do comprimento de onda que decorre do efeito Brillouin.

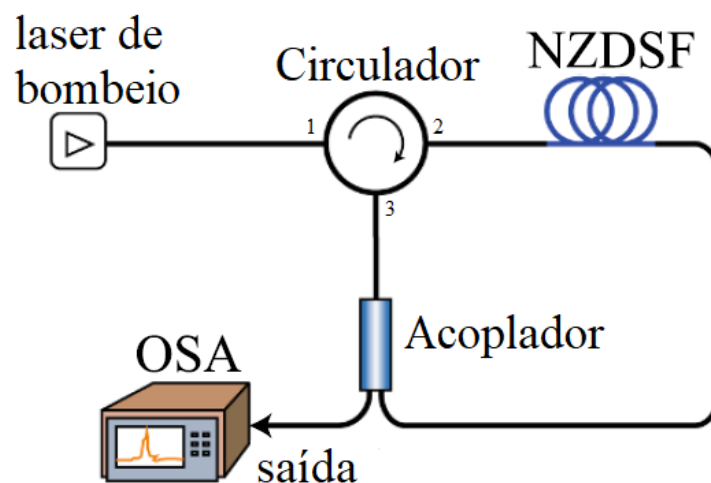
As seções 3.1 e 3.2 descrevem como funciona o laser Brillouin, tanto na configuração de um único comprimento de onda quanto na configuração de múltiplos comprimentos de onda.

### 3.1 Laser Brillouin de um Único Comprimento de Onda

O esquemático de um laser Brillouin de um único comprimento de onda pode ser visto na Figura 2.

O laser de bombeio entra pelo circulador e chega à fibra que age como meio para o ganho de Brillouin, onde ocorre o espalhamento Brillouin quando o limiar de potência necessário é atingido. Considerando as características retro-espalhadas do SBS, as ondas Stokes retornam à porta 2 do circulador óptico e agora podem ser medidas na porta 3, onde o acoplador direciona parte da potência a um Analisador de Espectro Óptico (OSA, do inglês *Optical Spectrum Analyzer*) para observar o efeito e a outra parte de volta a fibra, que agora funciona como um amplificador óptico, transferindo potência ao novo comprimento de onda gerado.

Figura 2 – Laser Brillouin de um único comprimento de onda



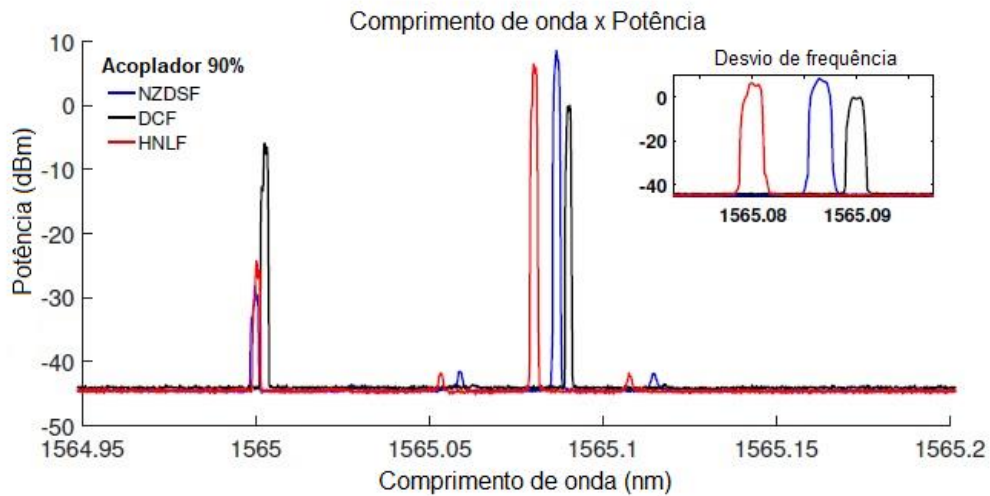
Fonte: Silva e outros (2020).

Nota: Adaptado e traduzido pelo autor.

Ao longo do tempo, a onda Stokes percorre sucessivas voltas na fibra, o processo de amplificação deixa de ser espontâneo e passa a ser estimulado. Isso vai diferenciar o laser de um amplificador óptico.

A Figura 3 mostra como é o espectro de um laser Brillouin em três diferentes tipos de fibra, cada um com o seu respectivo desvio de frequência.

Figura 3 – Espectro de um laser Brillouin de um único comprimento de onda



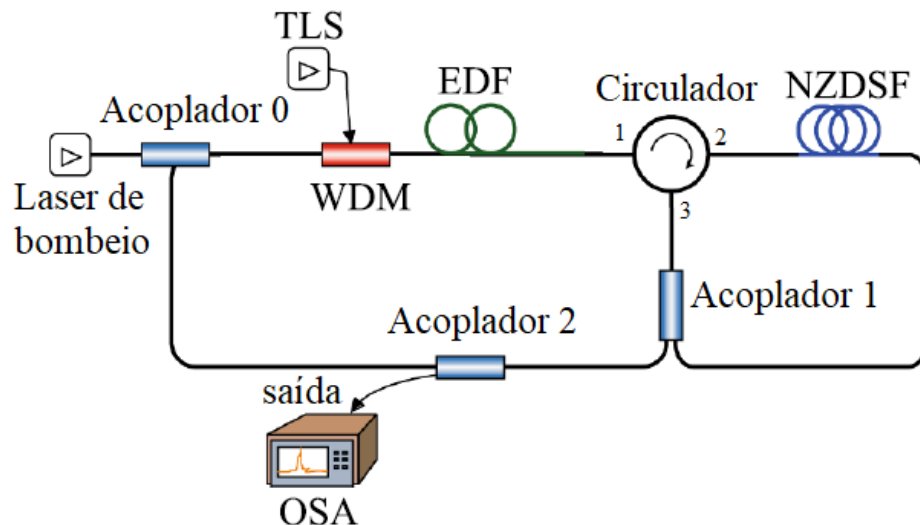
Fonte: Silva e outros (2019).

Nota: Traduzido pelo autor.

### 3.2 Laser Brillouin de Múltiplos Comprimentos de Onda

Para se obter múltiplos comprimentos de onda, é necessária uma configuração que faz com que as ondas Stokes, que já possuem um comprimento de onda maior, passem de novo pela fibra, cascadeando o efeito. Uma forma de fazer isso acontecer é usando uma realimentação e aproveitar a onda Stokes gerada para gerar uma nova e assim por diante. A Figura 4 mostra como isso pode ser obtido.

Figura 4 – Laser Brillouin em fibra com múltiplos comprimentos de onda



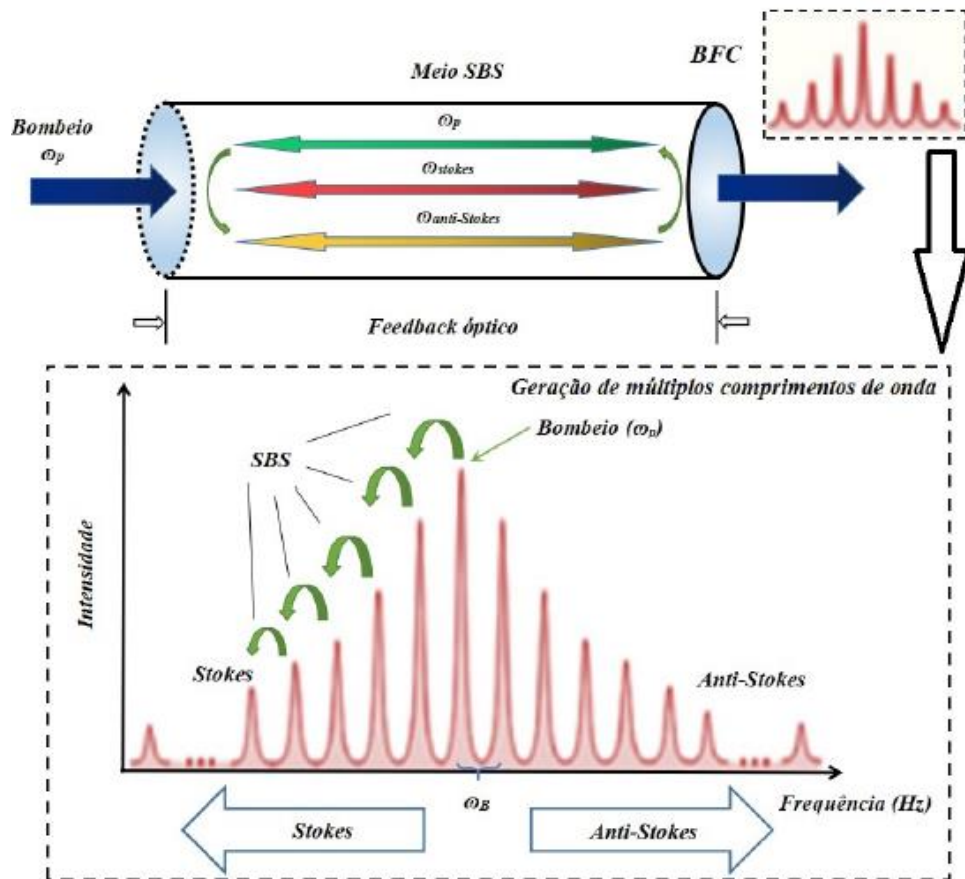
Fonte: Silva e outros (2020).

Nota: Adaptado e traduzido pelo autor.

Aqui, o laser de bombeio passa pelo Amplificador a fibra dopada com érbio (EDFA, do inglês *Erbium Doped Fiber Amplifier*) e chega ao circulador pela porta 1, onde é direcionado à Fibra com Dispersão Deslocada Não-Zero (NZDSF, do inglês *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber*) na porta 2. Ocorrendo o SBS, a primeira onda Stokes – que é contrapropagante por natureza – retorna ao circulador pela porta 2 e vai em direção ao acoplador 1 pela porta 3 do circulador. O acoplador retorna parte dessa potência à fibra para servir como amplificador para as novas ondas Stokes, enquanto o restante segue em direção ao acoplador 2. O acoplador 2 libera à saída parte dessa potência e então faz a realimentação, direcionando o restante dessa potência de volta ao EDFA através do acoplador 0, que se junta ao laser de bombeio.

A Figura 5 mostra como é a característica do espectro desse laser.

Figura 5 – Espectro de um laser Brillouin de múltiplos comprimentos de onda



Fonte: Silva (2020).

Em cada volta do sinal pelo circuito óptico, é gerada uma nova onda Stokes com desvio de aproximadamente 10 GHz (SILVA et al., 2019). Repetindo o processo, novas ondas são geradas

com frequências cada vez menores (e, por consequência, comprimentos de onda cada vez maiores) até o EDFA saturar e o cascadeamento acabar.

### **3.3 Otimização da Quantidade de Comprimentos de Onda**

Otimizar esse processo apenas olhando para a configuração da Figura 4 não é uma tarefa trivial; não se pode, por exemplo, aumentar indefinidamente a potência do bombeio porque o EDFA eventualmente vai saturar e vai parar o processo. Em contrapartida, uma potência excessivamente baixa acarreta em falta de potência suficiente para atingir o limiar do SBS e prosseguir com o cascadeamento.

Os acopladores têm parte importante nesse processo, já que eles fazem o direcionamento das potências. No caso do Acoplador 2, direcionar muita potência à realimentação pode saturar o EDFA mais rapidamente, gerando menos comprimentos de onda. Da mesma forma, potências muito baixas podem não devolver potência o suficiente para permitir a continuidade do cascadeamento. O Acoplador 1 tem influência nesse processo também, já que ele direciona parte da potência que chega nele ao Acoplador 2. Sua dinâmica, entretanto, é um pouco diferente já que ele participa diretamente da interação com a cavidade de Brillouin.

O próprio amplificador pode ser alterado e modificar toda a dinâmica, uma vez que mudando seus valores de amplificação e curva de saturação, tudo se altera e o processo todo sofre modificações. O EDFA é discutido com mais detalhes na seção 4.4.

Em relação à fibra, os dois principais parâmetros são o seu material e o seu comprimento. Alterar o material implica em mudar algumas de suas propriedades, como sua atenuação. Obviamente, mudar esses valores muda completamente o comportamento da cavidade de Brillouin e como o bombeio se comporta na fibra, já que as potências são atenuadas de formas distintas. O comprimento da fibra também tem influência importante porque, com uma fibra muito curta, o bombeio não tem distância suficiente pra se transferir todo a um sinal de Stokes. Porém, com uma fibra muito longa, depois de já se transferir por completo, o restante da fibra apenas adiciona mais espaço para atenuar o sinal e piorar o desempenho.

### **3.4 Encontrando a Planicidade Espectral**

Tendo em vista toda a dinâmica do cascadeamento do SBS, é esperado que as potências dos comprimentos de onda gerados no laser sejam bem diferentes, principalmente considerando a saturação do EDFA e como a fibra pode dar o ganho de Brillouin e atenuar o bombeio, dependendo do seu tamanho.

Dependendo da aplicação, isso nem sempre é um problema e ter apenas uma quantidade otimizada de comprimentos de onda já é uma boa solução. Porém, para alguma situação prática específica pode ser interessante gerar menos comprimentos de onda, porém com menor variação de potência entre os comprimentos de onda gerados, evitando problemas na propagação ou na detecção de alguns comprimentos de onda e não de outros.

Por causa disso, é importante incluir na busca não só a maior quantidade possível de comprimentos de onda, mas como esses comprimentos de onda estão diferenciados em potência.

## **4 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO**

### **4.1 Metodologia**

Em relação à classificação descrita por Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa que esse trabalho descreve é, do ponto de vista de sua natureza, uma pesquisa aplicada, uma vez que visa solução de problemas específicos. Do ponto de vista de seus objetivos, a pesquisa se encaixa como explicativa, visto que quer determinar como a otimização pode ser atingida. Em relação aos procedimentos técnicos, o projeto pode ser visto como uma pesquisa experimental, que se dá com a determinação de um objeto de estudo, seleção de variáveis influenciadoras e definição das formas de controle dos efeitos produzidos pela variável ao objeto de estudo (PRODANOV; FREITAS, 2013). Sobre o ponto de vista da forma de abordagem do problema, ela é uma pesquisa quantitativa, já que serão tratadas como números as devidas informações a serem analisadas.

Como será discutido na seção 4.2, um grupo do LabTel (SILVA et al., 2020) adaptou um código em MATLAB para obter então um modelo para a propagação do sinal em uma fibra, na presença do espalhamento Brillouin. O modelo é baseado em uma descrição analítica previamente reportada do ganho de Brillouin, que leva em consideração a depleção do laser de bombeio utilizando teoria da perturbação, o que permite que se faça cálculos muito precisos para os BFL, funcionando tanto para configurações com um único comprimento de onda (Figura 2) como para múltiplos comprimentos de onda em cascata (Figura 4).

Considerando que, por ser uma solução analítica, a velocidade de aquisição do resultado é muito alta, o que justifica utilizar uma busca exaustiva entre as soluções. Nessa situação, podem ser analisados dezenas de milhares de casos em poucas horas, obtendo a solução mais adequada.

### **4.2 Solução Analítica**

Apesar das configurações de um laser Brillouin serem relativamente simples, encontrar a combinação certa de parâmetros, como as saídas dos acoplamentos, comprimento da fibra e o ganho de Brillouin no intuito de maximizar ou balancear a eficiência do laser e potência de saída pode ser considerado trabalhoso (SILVA et al., 2020).



Recentemente, foi apresentada uma solução analítica precisa que permite prever a performance de amplificadores Brillouin em fibra, trabalhando em qualquer regime usando uma fibra monomodo padrão como o meio para o ganho de Brillouin (GÖKHAN; GÖKTAŞ, 2019).

Essa solução resolve de forma aproximada as equações (6) e (7) que descrevem a evolução espacial do bombeio e das ondas de Stokes causadas pelo SBS. Essa solução analítica simultaneamente considera os efeitos de perda ao longo da fibra, o termo não-linear e a depleção do bombeio.

Como uma solução analítica não descreve corretamente a evolução espacial do bombeio guiado e as potências de Stokes causadas pelo SBS, a proposta de Gökhan e Göktaş (2019) foi dividir a solução em três regiões, dependendo do nível do bombeio ( $P_{P0}$ ) e do nível de Stokes ( $P_{SL}$ ) em relação a seus níveis críticos. Essa metodologia foi adotada porque cada região se comportava de maneira diferente, fazendo com que uma única equação não representasse bem todos os casos, requerendo três equações distintas para o funcionamento em qualquer situação.

A primeira região definida é a região fraca, onde o bombeio é menor que o nível crítico. A segunda é a forte, quando o bombeio excede o nível crítico. A terceira é a de saturação, onde o nível de Stokes é maior que a potência crítica de Stokes. O Quadro 1 mostra como são feitas as verificações para os regimes.

Quadro 1 – Transição de regimes no modelo analítico

<b>Nível do bombeio</b>	<b>Nível de Stokes</b>	<b>Regime</b>
$P_{P0} < P_{CR}$	$P_{SL} < P_{CS}$	Regime Fraco
$P_{P0} > P_{CR}$	$P_{SL} < P_{CS}$	Regime Forte
Qualquer valor de $P_{P0}$	$P_{SL} > P_{CS}$	Regime Saturado

Fonte: Silva e outros (2020).

Nota: Traduzido pelo autor.

No quadro, os níveis críticos de potência do bombeio ( $P_{CR}$ ) e de potência de Stokes ( $P_{CS}$ ) são descritos pelas equações (10) e (11), respectivamente.

$$P_{CR} = \frac{\Lambda + \sqrt{\Lambda^2 + 4\Lambda}}{2\gamma L} \quad (10)$$

$$P_{CS} = \frac{1}{\gamma L} \quad (11)$$

Sendo  $\Lambda = -\ln(P_{sL}\gamma L)$ ,  $\gamma$  o coeficiente não linear e  $L$  o comprimento total da fibra.

A potência de Stokes é calculada como uma função de propagação ao longo da posição  $z$  da fibra para os regimes fraco, forte e saturado –  $P_{S,w}$ ,  $P_{S,h}$  e  $P_{S,s}$ , respectivamente, como mostram equações a seguir. Essas são as três equações desenvolvidas por Gökhan e Göktaş (2019) que resolve o par de equações (6) e (7) de forma analítica, separando em três regiões distintas. As equações (12) a (14) descrevem a potência de Stokes para cada um dos regimes.

$$P_{S,w} = \exp\left(\frac{\alpha\gamma P_{P0} e^{\frac{-\gamma P_{sL} \exp(-\alpha L - z) + \beta z/L}{\alpha}} - \alpha\gamma P_{P0} e^{\frac{\beta - P_{sL} \gamma}{\alpha}}}{\alpha^2}\right) \times P_{sL} \exp\left(\frac{-\gamma^2 P_{P0} P_{sL} \Phi \exp(-\beta/\alpha) - \alpha^3(L - z)}{\alpha^2}\right) \quad (12)$$

$$P_{S,h} = \left(\frac{c_1(P_{P0} - c_1)}{P_{P0} e^{c_1 \gamma z} + c_1 - P_{P0}}\right) \times \exp\left(\alpha + \frac{\alpha(z - L)(c_1 \gamma - \alpha)}{c_1 \gamma}\right) \quad (13)$$

$$P_{S,s} = \frac{c_2(P_{P0} - c_2)}{P_{P0} e^{c_2 \gamma z} + c_2 - P_{P0}} \times \left(1 - \frac{e^{\alpha(z-L)} - 1 + \ln(\Omega) \frac{2\alpha}{c_2 \gamma}}{P_{P0} - c_2 / (P_{P0} e^{c_2 \gamma z} - P_{P0} + c_2)}\right) \quad (14)$$

Onde os termos  $\Phi$ ,  $\beta$ ,  $\Omega$ ,  $c_1$  e  $c_2$  são dados pelas equações (15) a (19).

$$\Phi = Ei\left(\frac{\gamma P_{sL} \exp(-\alpha(L - z))}{\alpha}\right) - Ei\left(-\frac{\gamma P_{sL}}{\alpha}\right) \quad (15)$$

$$\beta = \gamma P_{sL} e^{-\alpha L} - \alpha^2 L \quad (16)$$

$$\Omega = \frac{P_{P0} \exp(c_2 \gamma z / 2) - P_{P0} + c_2}{P_{P0} \exp(c_2 \gamma z) - P_{P0} + c_2} \quad (17)$$

$$c_1 = \left( \Lambda + \ln \left( \Lambda \left( 1 - \frac{\Lambda}{\gamma P_{p0} L} \right) \right) - \ln \left( 1 - \frac{1}{e^\Lambda} \right) \right) \times \frac{1}{\gamma L} \quad (18)$$

$$- \ln \left( 1 + \frac{\Lambda}{\gamma P_{p0} L (e^\Lambda - 1)} \right) \times \frac{1}{\gamma L}$$

$$c_2 = \frac{-0.99\gamma LP_{sL} - W(-\gamma LP_{sL} \exp(-0.99\gamma LP_{sL}))}{\gamma L} \quad (19)$$

Com  $\alpha$  sendo o coeficiente de perdas ópticas da fibra. A função  $Ei(z)$  na equação (15) é descrita pela equação (20):

$$Ei(z) = \int_1^{\infty} \frac{e^{zt}}{t} dt \quad (20)$$

e a função  $W(x)$  na equação (19) se refere à função  $W$  de Lambert, que satisfaz a condição da equação (21):

$$W(xe^x) = x \quad (21)$$

Silva e outros (2020) continuaram esse trabalho inicial desenvolvendo o *setup* do laser da Figura 4, usando os acopladores e o EDFA para criar a realimentação e cascatear o processo. O algoritmo utilizado para esse processo é descrito no pseudocódigo a seguir.

```

01. Pp0 = PBombeio x Ac0 x ganhoEdfa
02.
03. para n = 1 até tamanho(voltas da fibra) faça
04.   para i = 1 até tamanho(voltas da fibra) faça
05.
06.     se Pp0 < Pcr e PsL < Pcs
07.       Ps = Ps,w; %% calculado pela equação (12)
08.       caso contrário, se Pp0 > Pcr e PsL < Pcs
09.         Ps = Ps,h; %% calculado pela equação (13)
10.         caso contrário, se PsL > Pcs
11.           Ps = Ps,s; %% calculado pela equação (14)
12.       fim se
13.
14.       Ps = Ps/10^(alpha / 10);
15.       Ps,1 = Ps x Ac1 x Ac2;
16.       Ps,cav = Ps x (1 - Ac1);
17.     fim para
18.
19.   Pp0 = Ps x Ac1 x (1 - Ac2) x ganhoEdfa;
20.   Ps,n = Ps,1;
21. fim para

```

Além disso, o código armazena essas informações da potência do laser ao longo da fibra, além de comparar tudo com o caso experimental. Essas informações ao longo da fibra e do caso experimental não eram tão para esse trabalho, uma vez que o valor final da potência de Stokes é encontrado logo no início da fibra pela característica contrapropagante da onda; portanto, essas informações foram descartadas afim de ganhar em tempo de processamento.

A solução analítica do laser Brillouin de múltiplos comprimentos de onda foi desenvolvida para modelar um caso experimental (SILVA et al., 2020). Portanto, no seu caso, parâmetros da simulação como os valores dos acopladores, comprimento da fibra, potência de entrada etc., foram mantidos fixos.

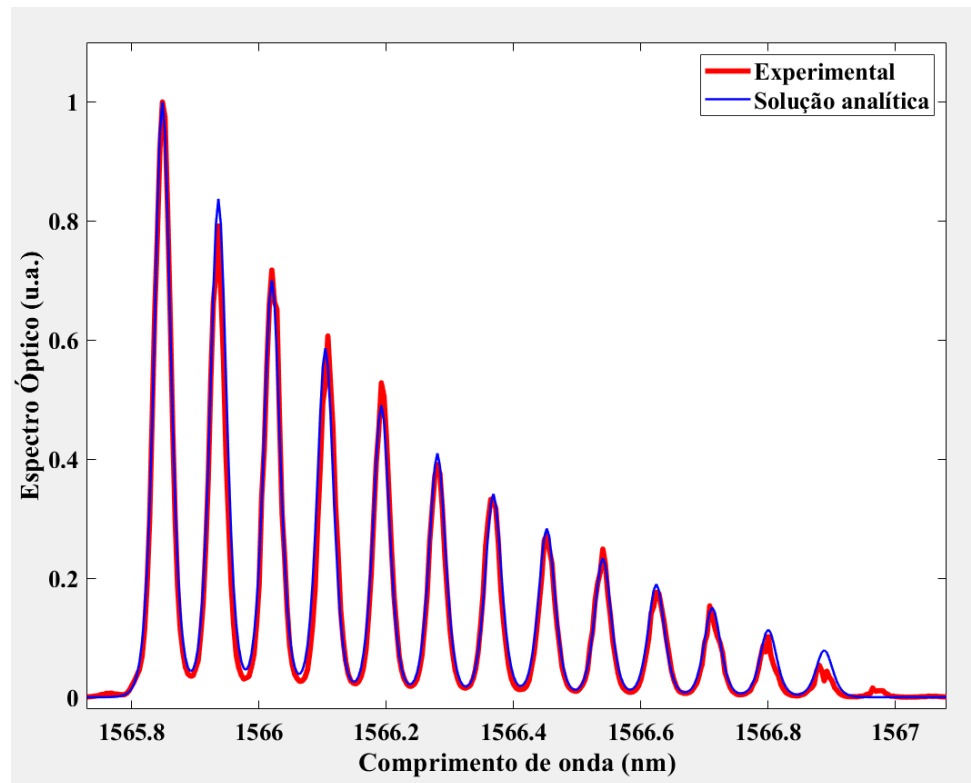
Essa solução é iterativa ao longo da fibra, portanto se faz necessário a inclusão de um valor inicial para a potência de Stokes no início da fibra, que idealmente é zero, já que na primeira iteração o processo do espalhamento começa no comprimento de onda de Stokes apenas a partir de ruído. Entretanto, a escolha de utilizar o valor inicial 0 se mostrou ruim porque trazia muitos problemas numéricos de erros de cálculo. Para contornar isso, o valor utilizado foi de  $10^{-30}$  W. Entretanto, alguns erros numéricos ainda foram identificados; tais erros e seus tratamentos serão discutidos nas seções 4.6.1 e 4.6.2.

### **4.3 Reconstrução Gráfica do Sinal**

Para simular um OSA, foi utilizado uma sequência de secantes hiperbólicas ao quadrado – uma para cada comprimento de onda – e assim têm-se a visualização dos comprimentos de onda gerados.

O código tem apenas a informação do valor de potência de determinado comprimento de onda, e com esse valor ele gera esse gráfico de uma  $\text{sech}^2$  deslocada no eixo x em 0,09 nm (que equivale a um deslocamento de aproximadamente 10 GHz). Esse valor de deslocamento utilizado é característica intrínseca da fibra de sílica (AGRAWAL, 2013) que foi adotada nesse trabalho. A Figura 6 mostra a comparação dessa reconstrução gráfica com um dado experimental feita por Silva e outros (2020), mostrando como esse modelo é capaz de entregar resultados bem precisos em relação ao visto experimentalmente em um OSA.

Figura 6 – Comparação entre o resultado da solução analítica e a resposta colhida experimentalmente



Fonte: Silva e outros (2020).

Nota: Traduzido pelo autor.

A reconstrução gráfica, por ser uma ferramenta visual, possibilita a detecção de erros na simulação com maior facilidade. A seção 4.6.1 vai mostrar quais erros foram vistos nos gráficos e como foram identificados no código.

#### 4.4 Saturação do Amplificador Óptico

No modelo original publicado por Silva e outros (2020), o EDFA tinha um ganho fixo de 11,4 dB. Esse é um modelo simplificado que não leva em consideração a saturação do amplificador. Para os casos discutidos na publicação isso não era um problema uma vez que as potências eram baixas e o EDFA não chegava a saturar. Entretanto, como aqui é necessário um caso mais genérico para abranger uma faixa maior de potências, incluiu-se um modelo de saturação do EDFA.

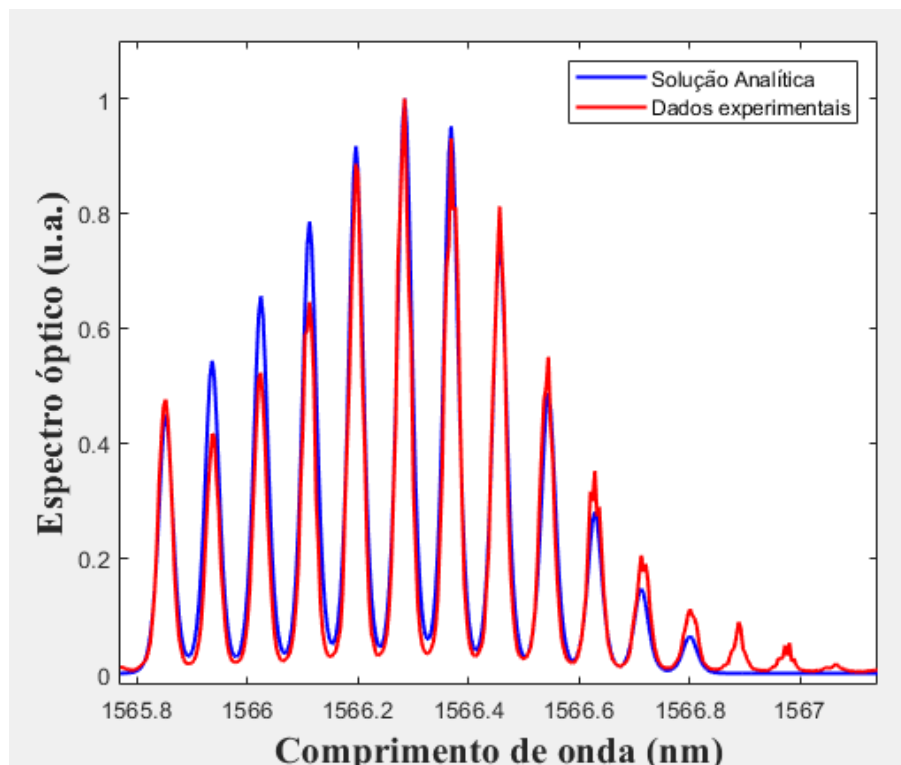
O amplificador foi modelado a partir de uma observação experimental de um EDFA, feita pelo Laboratório de Telecomunicações da Ufes (LabTel). Após a coleta dos dados experimentais, foi modelado uma equação analítica com o formato apresentado na equação (22).

$$G_{dB} = \frac{G_{MAX}}{\sqrt{1 + A \cdot P_{in}^B}} \quad (22)$$

Onde  $G_{dB}$  é o ganho do amplificador em dB,  $G_{MAX}$  é o ganho máximo do amplificador em dB e  $P_{in}$  é a potência de entrada no amplificador, em mW. Os parâmetros A e B são números reais calculados para ajustar a curva aos dados obtidos. O valor de ganho máximo utilizado foi o mesmo utilizado no modelo original: 11,4 dB.

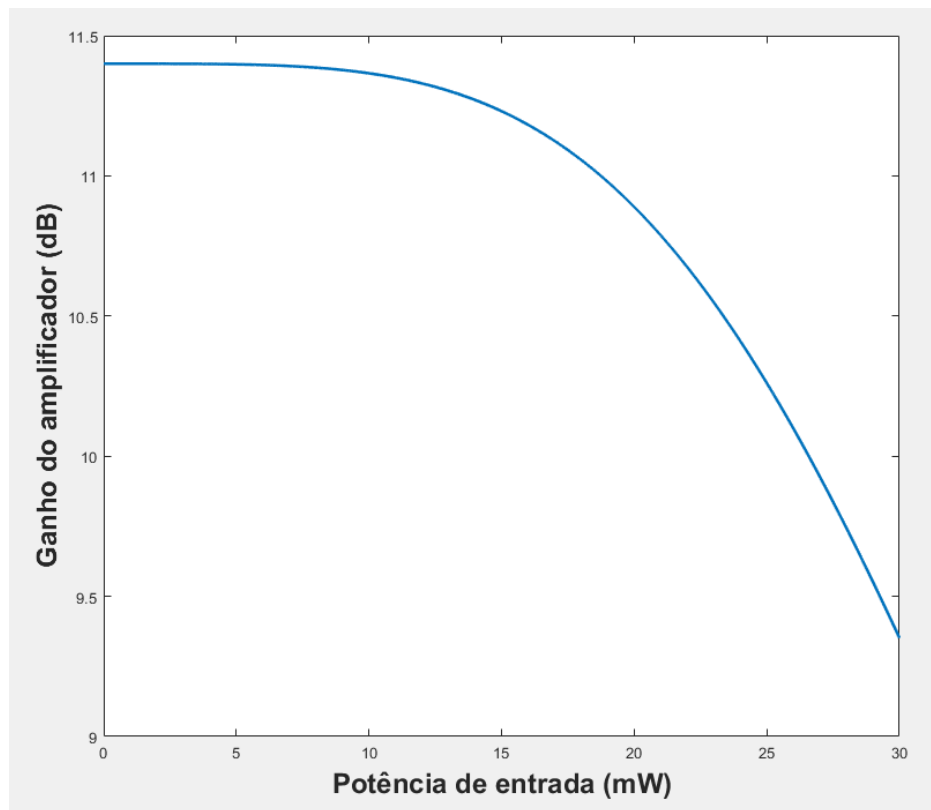
A Figura 7 mostra como o modelo se comporta com a inclusão da saturação do EDFA. Aqui, graficamente se chega à conclusão que o formato apresentado na equação (22) modela bem o comportamento do EDFA, comparando com uma situação experimental. O erro médio visto foi de 1,14% em relação ao dado experimental. Em seguida, a Figura 8 mostra a curva usada para o ganho do amplificador.

Figura 7 – Comparação: dados experimentais e solução analítica com a inclusão da saturação do EDFA



Fonte: Silva e outros (2020).  
Nota: Adaptado pelo autor.

Figura 8 – Curva da relação do ganho do EDFA com a potência de entrada



Fonte: Produzido pelo autor.

#### 4.5 Parâmetros Utilizados

Para esse trabalho foram escolhidos 4 parâmetros que teriam influência considerável sobre o resultado. Pela configuração mostrada na Figura 4, os acopladores são claramente parte importante já que são eles que definem o fluxo de potência. A potência de entrada também teve influência direta, já que a quantidade de potência na entrada no amplificador influencia diretamente no seu ganho como discutido na seção 4.4. Além desses, o outro parâmetro escolhido foi o comprimento da fibra.

Particularmente, encontrar o comprimento ótimo da fibra é uma das grandes vantagens de se utilizar uma simulação, uma vez que, experimentalmente, trocar os acopladores é simples, e até trocar a potência de entrada, porém não é fácil mudar o comprimento de uma fibra, ainda mais considerando as dimensões quilométricas em questão.

Os parâmetros escolhidos, bem como suas faixas de variação estão descritos a seguir:

- Saída do acoplador 1: de 5 a 95% da entrada, com passo de 1%;
- Saída do acoplador 2: de 5 a 95% da entrada, com passo de 1%;
- Comprimento da fibra: de 10 a 25 km, com passo de 500 m;
- Potência do sinal de entrada: de 0,4 a 5 mW, com passo de 0,2 mW.

Nessa situação, algumas propriedades do sistema ficaram fixas, uma vez que seria computacionalmente custoso adicionar outros parâmetros para varredura. Assim, parâmetros como o material da fibra (que acarreta no valor do seu coeficiente de atenuação), tipo de amplificador - que pode ter até 2 graus de liberdade - ficaram constantes. Foi utilizado um valor de atenuação na fibra de 0,402 dB/km (valor típico para uma NZDSF – AGRAWAL, 2013). O amplificador utilizado foi o EDFA, discutido na seção 4.4.

Esses parâmetros podem ser utilizados para abranger outras possibilidades de configurações com diferentes tipos de fibra e de amplificadores ópticos. Outra possibilidade seria a alteração desses valores para atender uma aplicação específica.

#### 4.6 Simulação e Busca

A simulação do laser Brillouin de múltiplos comprimentos de onda usou a adaptação feita da solução analítica descrita nos itens 4.1, 4.3 e 4.4. A ideia é determinar um espaço e rodar a solução analítica em todos os casos dentro desse espaço de busca. A sua dimensão é dependente do número de parâmetros escolhidos para varrer o espaço durante a simulação.

Depois de feita a simulação em todos os casos das combinações dos parâmetros descritos em 4.5, tem-se uma função `laser_brillouin` com o domínio nesse espaço e assumindo valores escalares que são armazenados em uma matriz  $S$  e podem ser facilmente checados *a posteriori*. O valor retornado por essa função é a quantidade de comprimentos de onda gerados com a simulação usando os parâmetros de entrada do sistema. Dessa forma, a expressão `laser_brillouin([95% 65% 17,5 km 0,6 mW]) = 6` descreve que na situação em que o acoplador 1 libera 95% de sua entrada para a saída, o acoplador 2 libera 65% de sua entrada para a saída, a fibra tem um comprimento de 17,5 km e a potência de entrada é de 0,6 mW, o efeito Brillouin



ocorre gerando 6 comprimentos de onda diferentes (situação fictícia apenas para fins de exemplo).

A seguir é descrito o pseudocódigo para essa implementação:

```

01. acop_1 = [0.05, 0.06, 0.07, ..., 0.95];    %% saída do acoplador 1
02. acop_2 = [0.05, 0.06, 0.07, ..., 0.95];    %% saída do acoplador 2
03. comp = [10000, 10500, 11000, ..., 25000]; %% comprimento da fibra
04. pot = [0.4, 0.6, 0.8, ..., 5];            %% potência de entrada
05.
06. para c1 = 1 até tamanho(acop_1) faça
07.   para c2 = 1 até tamanho(acop_2) faça
08.     para L = 1 até tamanho(comp) faça
09.       para i = 1 até tamanho(pot) faça
10.
11.         param = [acop_1(c1) acop_2(c2) comp(L) pot(i)];
12.         S(c1,c2,L,i) = laser_brillouin(param);
13.
14.       fim_para %% potencia
15.     fim_para %% comprimento
16.   fim_para %% acoplador_2
17. fim_para %% acoplador_1

```

Considerando os parâmetros de busca utilizados, ao todo são possíveis 6.161.064 combinações distintas para se calcular o número de comprimentos de onda gerados em um sistema com essas configurações. Após a otimização do código inicial, cada chamada da função principal levava entre 1 e 8 milissegundos para ser concluída, o que acarreta um tempo de processamento total de aproximadamente 7 horas e 40 minutos <sup>3</sup>.

#### 4.6.1 Detecção de erros

Durante o desenvolvimento, com o auxílio da ferramenta gráfica (conforme 4.3), alguns erros foram identificados. Os erros eram, em sua maioria, de natureza numérica e aconteciam principalmente porque todo o processo é fundamentado numa representação analítica que pode conter imprecisões devido às simplificações inerentes.

Os erros encontrados foram:

---

<sup>3</sup> Valores obtidos em um computador com processador Intel(R) Core(TM) i5-8265U CPU @ 1,80 – 2,70 GHz, com 8 GB de RAM instalada. Processadores com maior poder computacional levariam menos tempo para a execução dessa tarefa.

- Resultado NaN;
- Potências extremamente altas;
- Potências negativas;
- Comprimentos de onda estagnados;
- Nenhum comprimento de onda gerado;
- Saltos repentinos na potência;

Para detectá-los, o código lidou com cada um de uma forma diferente.

Em resultados que não são um número (NaN, do inglês *Not a Number*) acontecem quando alguma operação matemática tem seu resultado inválido, e, portanto, seu retorno não é numérico. Isso pode acontecer, por exemplo, em situações onde a interpretação do código é a mesma de 0 dividido por 0 ou infinito dividido por infinito (Inf/Inf). Qualquer operação que utiliza um NaN também retorna NaN, o que pode causar uma falha cascadeada se algum comprimento de onda assumir esse valor. Por isso esse caso foi marcado como um erro NaN.

Erros numéricos podem causar, por exemplo, que um número se torne excessivamente alto por erro de arredondamento ou truncamento, como no caso hipotético de duas variáveis  $a$  e  $b$  estarem em um denominador de uma fração no formato  $1/(a-b)$ . Sendo  $a$  e  $b$  valores muito próximos, o programa pode interpretar esse valor como zero e então o resultado de tal divisão seria infinito, resultando num número extremamente alto.

Caso semelhante foi visto na execução do código e a identificação foi feita da seguinte forma: se a potência gerada pelo comprimento de onda  $n$  for maior que a potência gerada pelo comprimento de onda  $(n-1)$  multiplicado pelo ganho máximo do amplificador, então o caso era classificado como um erro de potências excessivamente altas para fazer o tratamento.

Se por algum motivo algum comprimento de onda resultou em uma potência negativa, isso indica uma possível falha numérica e foi tratada como um erro de potências negativas.

Em testes, foi visto que eventualmente alguns comprimentos de onda geravam novos com exatamente a mesma potência, e o processo se repetia indefinidamente. Isso, além do erro numérico, deixava a simulação mais lenta. Assim, quando mais do que 40 comprimentos de onda seguidamente diferiam de menos de  $1,5 \times 10^{-5}$  W, o caso era marcado também como erro de estagnação.

Se no final do processo, quando nenhum dos erros mencionados anteriormente aconteceu, mas por algum motivo o SBS não foi gerado (verificado pelo número de comprimentos de onda gerados), isso é identificado e marcado como um possível erro e será tratado.

Em determinadas situações, problemas numéricos causam variações abruptas de potência, que não são compatíveis com o resultado esperado do fenômeno. Para identificação, usou-se a ferramenta de detecção de picos do MATLAB (função *findpeaks*). Essa detecção foi feita no sinal composto apenas pelos picos dos comprimentos de onda gerados, traçando uma envoltória no espectro final do laser. O esperado é apenas um pico nessa envoltória, mostrando um sinal suave, sem muitos movimentos bruscos; portanto se houver mais de um pico, o código marca a situação como erro.

#### 4.6.2 Tratamento de erros

Após a identificação de erros, a solução encontrada foi o de aumentar o valor da potência inicial de Stokes de  $10^{-30}$  W para  $10^{-5}$  W, onde os erros ocorrem com menor frequência, com o custo de menor precisão dos cálculos feitos, uma vez que o valor utilizado é menos próximo da realidade. Mudando essa constante, a busca foi refeita apenas sobre os casos onde foram encontrados erros. Os casos onde foram encontrados novos erros na segunda busca foram descartados.

#### 4.6.3 Maior número de comprimentos de onda

Uma vez que se tem a quantidade de comprimentos de onda gerados para cada configuração determinada, pode-se utilizar as ferramentas do MATLAB para obter de forma fácil os máximos usando a seguinte linha de código MATLAB:

```
[c1,c2,L,i] = ind2sub(size(S),find(S == max(S(:))));
```

A expressão `max(S(:))` retorna o valor máximo de `S`. Aqui, `S` é uma matriz  $91 \times 91 \times 31 \times 24$ , em que cada dimensão representa os índices dos vetores das configurações mencionadas em 4.5. A chamada da função `find` retorna o índice de `S` onde se encontra o valor máximo, entretanto esse índice é retornado de forma linear, então é necessário outro tratamento. Se `S` contiver o seu valor máximo em mais de uma posição, a função `find` retorna uma lista de índices lineares. A função `ind2sub` transforma esse índice linear em um índice de páginas, de acordo com as dimensões da matriz `S` (determinadas pela função `size`).

#### 4.6.4 Maior número de comprimentos de onda para cada parâmetro

De forma semelhante à busca geral, a busca em cada parâmetro requer apenas a restrição da matriz  $S$  para um valor fixo de um parâmetro.

Como exemplo, segue o código MATLAB para a busca de maior número de comprimentos de onda em relação à potência do sinal de entrada.

```
for index = 1:length(input_power)
    [c1,c2,L,i] = ind2sub(size(S),find(S == max(S(:,:,index),[],'all')));
    opt_config(index) = S(c1,c2,L,i);
end
```

Dessa forma, ao final do loop, tem-se o vetor `opt_config` contendo o mesmo número de elementos do vetor representando a potência do sinal de entrada (`input_power`) onde estão armazenados o número máximo de comprimentos de onda gerados para aquela entrada, o que possibilita analisar a variação da quantidade de comprimentos de ondas gerados à medida em que se aumenta a potência de entrada. A implementação é análoga para os outros três parâmetros.

#### 4.6.5 Planicidade espectral

De forma análoga à feita na busca geral, foi feita a implementação de uma nova busca que retorna não o número total de comprimentos de onda gerados, mas somente aqueles que tinham uma diferença máxima de 3 dB do comprimento de onda de maior potência, considerando então o melhor caso com a maior quantidade de comprimentos de onda cujas potências não variavam mais do que 3 dBm entre si.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Busca Geral

A busca geral mostrou 2 resultados máximos, gerando 75 comprimentos de onda em duas configurações diferentes. Tais configurações são dispostas no Quadro 2.

Quadro 2 – Configurações dos resultados da otimização

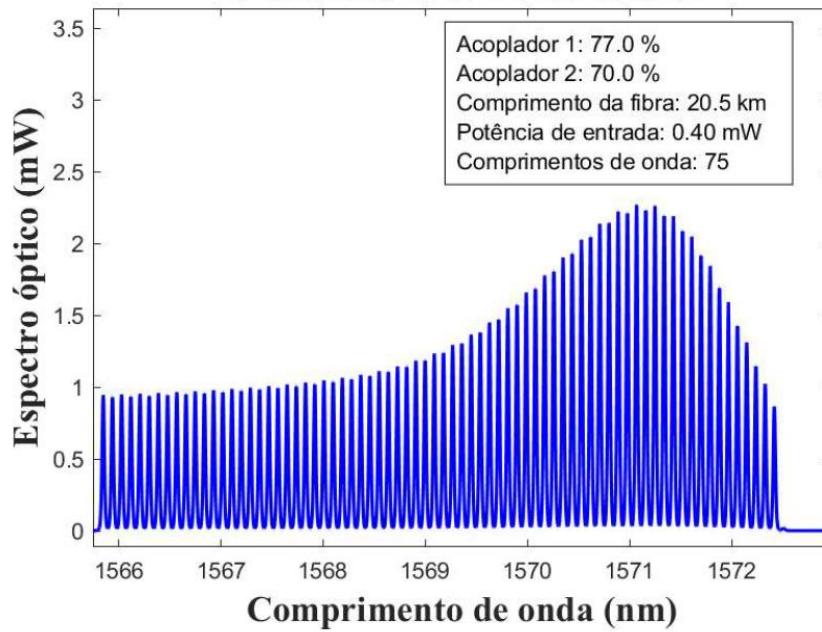
	<b>Configuração 1</b>	<b>Configuração 2</b>
<b>Acoplador 1</b>	77,0 %	75,0 %
<b>Acoplador 2</b>	70,0 %	69,0 %
<b>Comprimento da Fibra</b>	20,5 km	17,0 km
<b>Potência de entrada</b>	0,40 mW	0,40 mW

Fonte: Produzido pelo autor.

A potência de saída total do laser na configuração 1 é de 103,05 mW e do laser na configuração 2 é de 104,37 mW. Em relação à planicidade espectral, a configuração 1 resultou em 40 comprimentos de onda dentro da margem de 3 dB, enquanto a configuração 2 resultou em 30 comprimentos de onda. As potências de entrada aqui são visivelmente baixas, já que assim evitam o efeito de saturação do EDFA, mas não tão baixas a ponto de não terem potência suficiente pra continuar o processo.

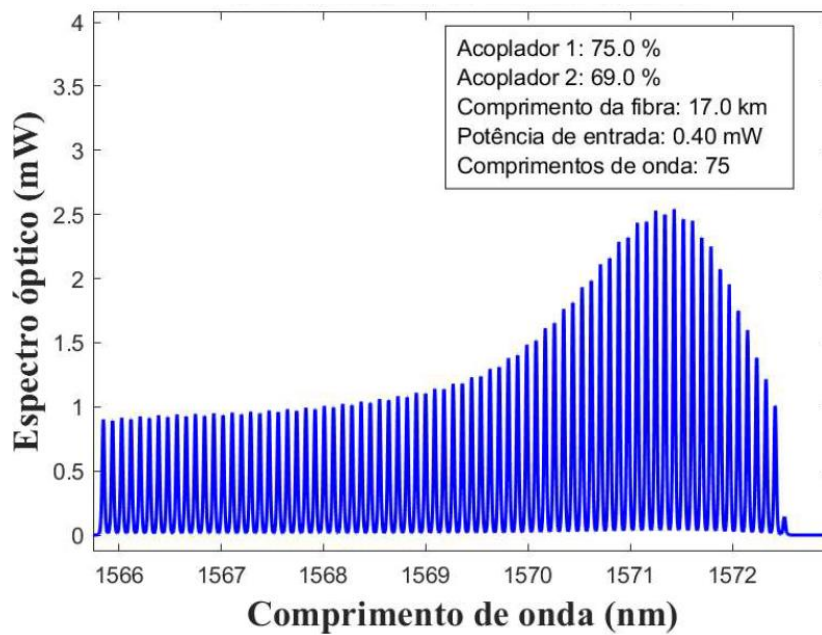
As Figura 9 e Figura 10 mostram a representatividade gráfica desses dois resultados. Um fato que fica claro nessas figuras é que suas formas são bem similares, apresentando um crescimento lento na potência, depois um crescimento um pouco mais rápido e uma queda mais brusca. Isso se deve porque o ganho de Brillouin na fibra também muda de acordo com a potência de entrada. Então, de acordo que a potência que chega na fibra vai se aproximando de certo valor, o valor das potências de Stokes geradas vai aumentando. Porém, se esse processo aumenta muito, o EDFA começa a saturar e então a potência dos novos comprimentos de onda gerados começa a cair até parar o cascadeamento.

Figura 9 – Resultado da busca principal – configuração 1



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 10 – Resultado da busca principal – configuração 2



Fonte: Produzido pelo autor.

Para fins de comparação, a configuração utilizada por Silva e outros (2020) ao apresentar o uso da solução analítica para o laser Brillouin de múltiplos comprimentos de onda foi de:

- Acoplador 1: 20,0 %
- Acoplador 2: 19,0 %
- Comprimento da fibra: 25,0 km
- Potência de entrada: 1 mW

Por consequência de não serem otimizados, o número de comprimentos de onda gerados é inferior (conforme Figura 6). Na seção 5.3 será discutido como que alterar esses parâmetros altera o resultado final, mostrando como se comportou a busca em cada parâmetro analisado.

## 5.2 Erros Encontrados

Como descrito anteriormente, foi feita uma detecção e contagem de erros durante a busca. Dos 6.161.064 de casos simulados, 648.418 – equivalente a 10,52 % do total- foram identificados como erros. A distribuição desses erros nas 6 categorias descritas em 4.6.1 pode ser vista a seguir:

- Resultado NaN: 10.795 (1,66 %)
- Potências extremamente altas: 78.302 (12,08%)
- Potências negativas: 51.065 (7,88 %)
- Comprimentos de onda estagnados: 6.825 (1,05 %)
- Nenhum comprimento de onda gerado: 492.792 (76,00 %)
- Saltos repentinos na potência: 8.638 (1,33 %)

Na segunda etapa de buscas, apenas nos 648.418 casos de erro, o número de erros foi de 122.589, casos que foram descartados.

O resultado gráfico do tratamento desses erros foi mostrado no APÊNDICE A ao fim do documento.

## 5.3 Busca em Cada Parâmetro

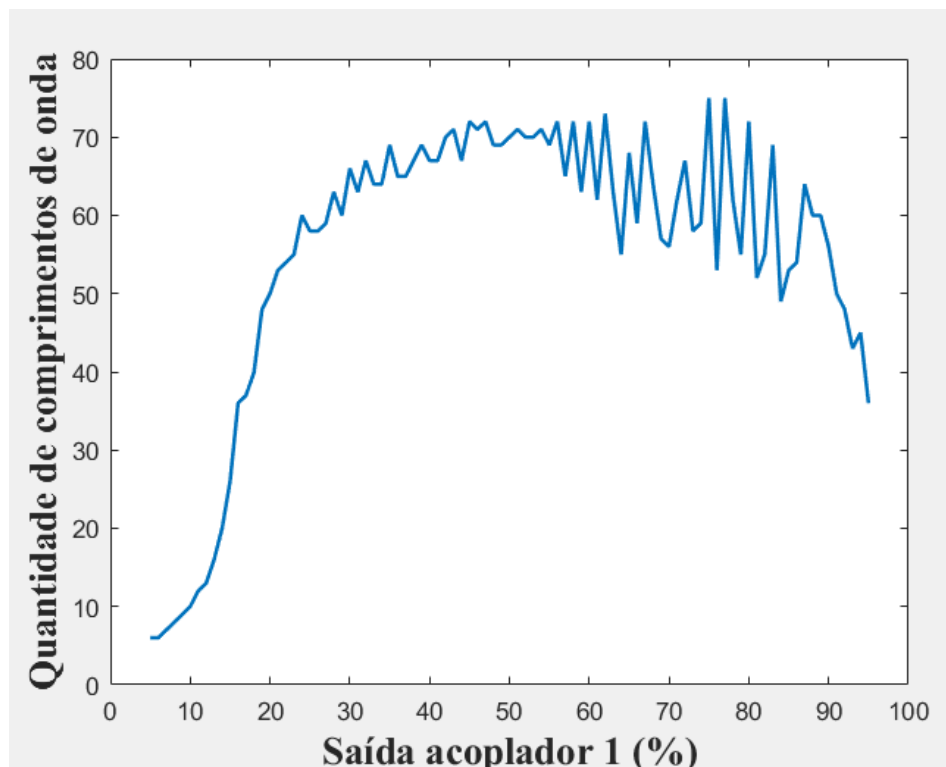
Cada valor de cada parâmetro tem associado a ele uma matriz de três dimensões, envolvendo os outros três parâmetros. Como descrito na seção 4.6.4, para cada um dos quatro parâmetros,

foi extraído o valor máximo de comprimentos de onda nessa seção do espaço de busca. Isso foi feito para cada valor de cada parâmetro. Esses resultados são apresentados e discutidos nas seções a seguir.

### 5.3.1 Acoplador 1

Apesar de não ser uma curva totalmente suave, a Figura 11 mostra uma relação entre a quantidade de comprimentos de onda gerados e a saída do Acoplador 1, que tem sua região máxima entre 30 e 80%, aproximadamente.

Figura 11 – Comprimentos de onda máximos relacionados ao Acoplador 1



Fonte: Produzido pelo autor.

Se o acoplador deixar pouca potência para a saída e realimentação, tem-se pouca potência para participar da próxima iteração. Continuando isso, o processo logo não tem potência suficiente para continuar o cascadeamento e, portanto, cessa a geração de novos comprimentos de onda.

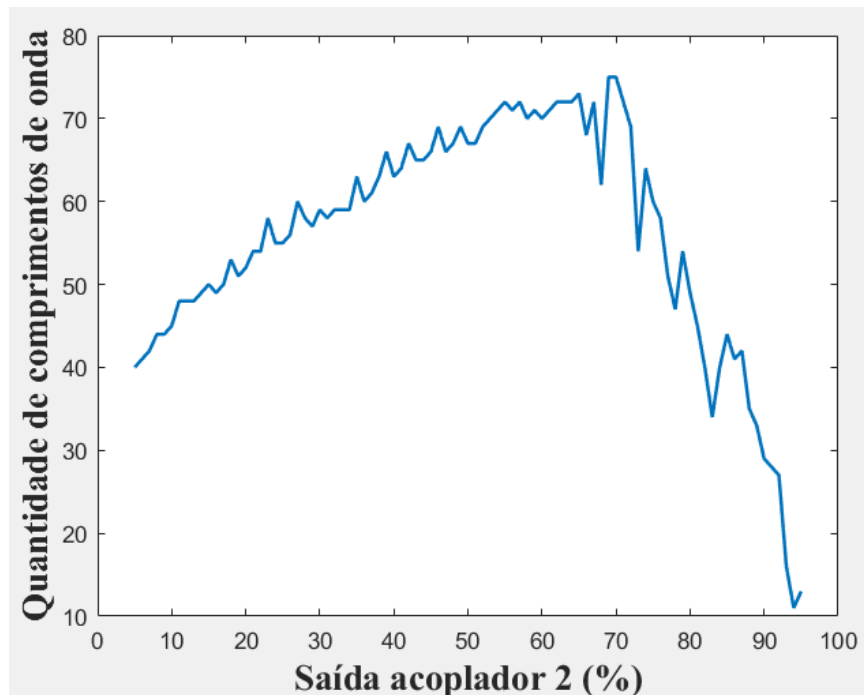
Antagonicamente, se muita potência for direcionada à realimentação, têm-se mais potência pra saturar o EDFA prematuramente, diminuindo também a quantidade de comprimentos de onda gerados. A região ótima, como vista na Figura 11, é intermediária.



### 5.3.2 Acoplador 2

De forma bem similar, a Figura 12 mostra essa relação para o Acoplador 2, que tem seu pico bem mais definido ao redor da marca dos 70%. Essa curva se mostra mais definida e menos ruidosa comparada à curva do Acoplador 1, vista na Figura 11.

Figura 12 – Comprimentos de onda máximos relacionados ao Acoplador 2



Fonte: Produzido pelo autor.

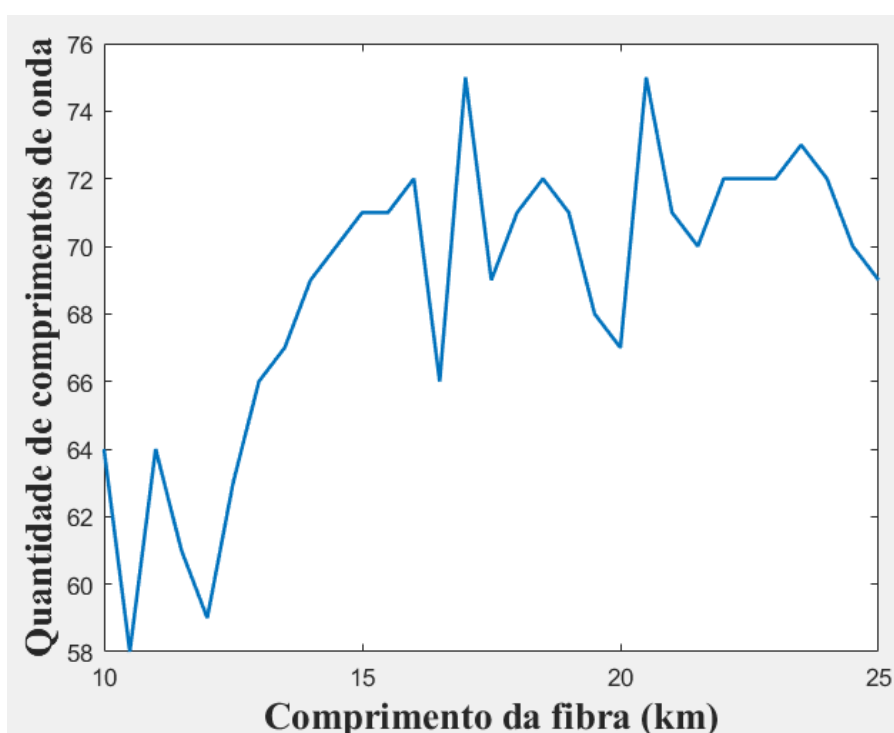
Ainda de forma análoga ao Acoplador 1, a região ótima se encontra mais centralizada, seja por causa da falta de potência na realimentação – ocasionando falta de potência suficiente para continuar o cascadeamento – ou por excesso de potência, ajudando o EDFA a saturar e parar o processo.

A diferença no formato dos dois gráficos se deve provavelmente por causa da interação do Acoplador 1 diretamente com a cavidade de Brillouin, e também do fato do Acoplador 2 estar diretamente ligado à realimentação.

### 5.3.3 Comprimento da fibra

Apesar da baixa resolução implementada na busca no parâmetro de comprimento da fibra, é possível notar um claro aumento na quantidade de comprimentos de onda gerados quando há um aumento do tamanho da fibra. Esse crescimento parece ter alguns sinais de saturação, indicando que aumentar excessivamente o tamanho da fibra pode não resultar em aumentos significativos na quantidade de comprimentos de ondas gerados. A Figura 13 ilustra esse resultado.

Figura 13 – Comprimentos de onda máximos relacionados ao tamanho da fibra



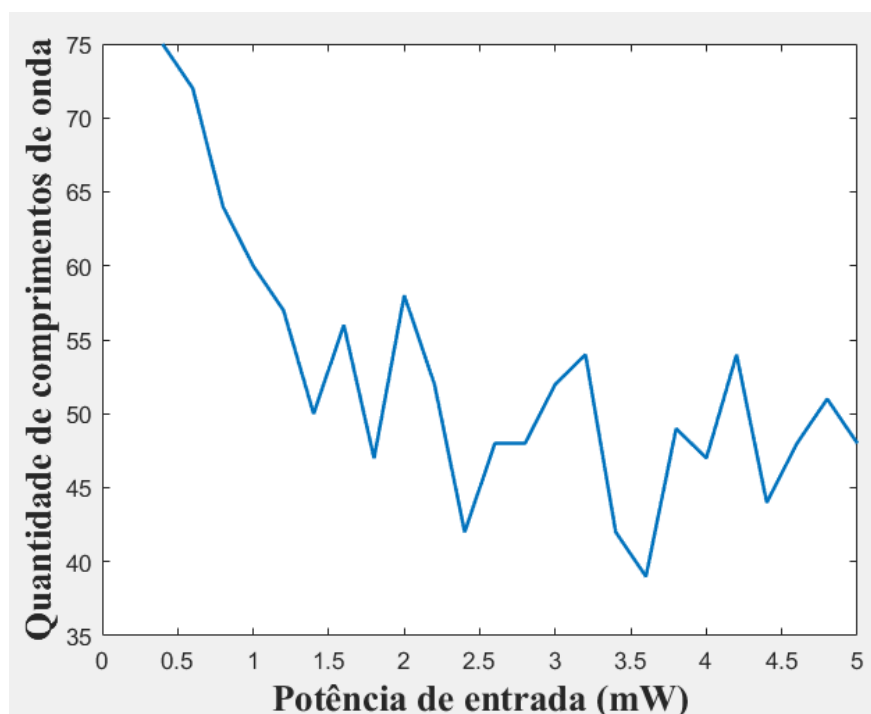
Fonte: Produzido pelo autor.

Como mencionado antes, em uma fibra muito curta, o bombeio não tem distância suficiente para se transferir todo a um sinal de Stokes; porém com uma fibra muito longa, depois de já se transferir por completo, o restante da fibra apenas adiciona mais espaço para atenuar o sinal e piora o desempenho.

### 5.3.4 Potência de entrada

Na potência de entrada é visto o contrário do comportamento da relação com o comprimento da fibra: com o aumento da potência de entrada, a quantidade de comprimentos de onda gerados parece diminuir, causando essa progressão descendente vista na Figura 14.

Figura 14 – Comprimentos de onda máximos relacionados à potência de entrada



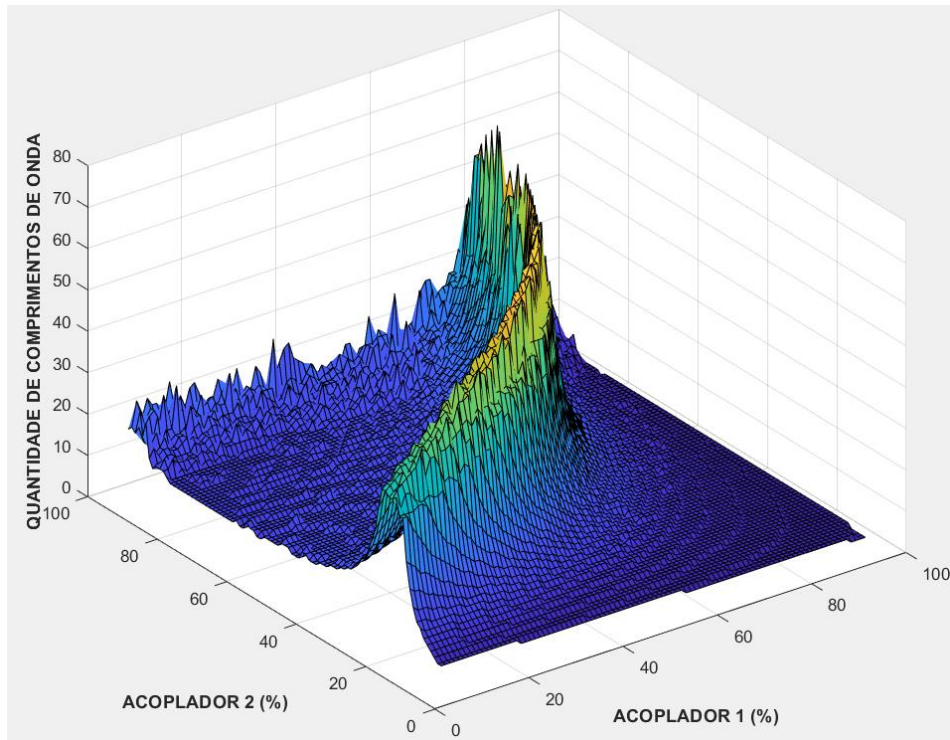
Fonte: Produzido pelo autor.

Esse efeito da diminuição é claramente efeito da saturação do EDFA, que ao aumentar a potência, diminui seu ganho até chegar a um ponto que cessa o cascadeamento.

### 5.3.5 Acopladores 1 e 2 em conjunto

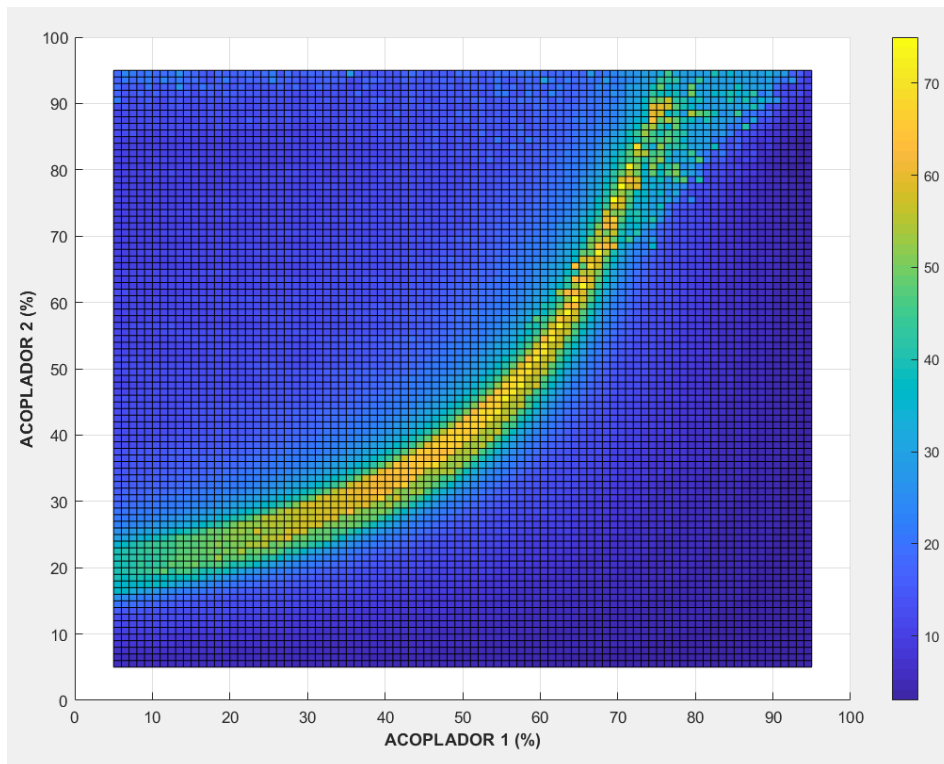
Como há 2 parâmetros que provêm de um mesmo tipo de componente, parece razoável ver como os dois parâmetros se comportam para produzir os resultados. O gráfico na Figura 15 mostra uma superfície onde os eixos X e Y representam os valores dos acopladores 1 e 2, enquanto o eixo Z mostra o maior número de comprimentos de onda gerados com as configurações de acopladores dos eixos X e Y. A Figura 16 mostra um mapa de cores contendo a mesma informação da superfície, mas agora representando o eixo Z puramente em forma de cores, onde a escala se aproxima do azul quando há menos comprimentos de ondas gerados e se aproxima do amarelo quando há mais comprimentos gerados.

Figura 15 – Comprimentos de onda máximos relacionados aos acopladores



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 16 – Mapa de cores - acopladores



Fonte: Produzido pelo autor.

Nas Figuras 15 e 16 é visível que tem um caminho no plano que se destaca do resto, apresentando maior quantidade de comprimentos de onda. Observa-se também que a região com maiores valores está entre 60 e 80% para o Acoplador 1 e entre 55 e 75% para o Acoplador 2. O mapa de cores da Figura 16 é acompanhado de uma barra lateral pra indicar a quantidade de comprimentos de onda que cada cor representa.

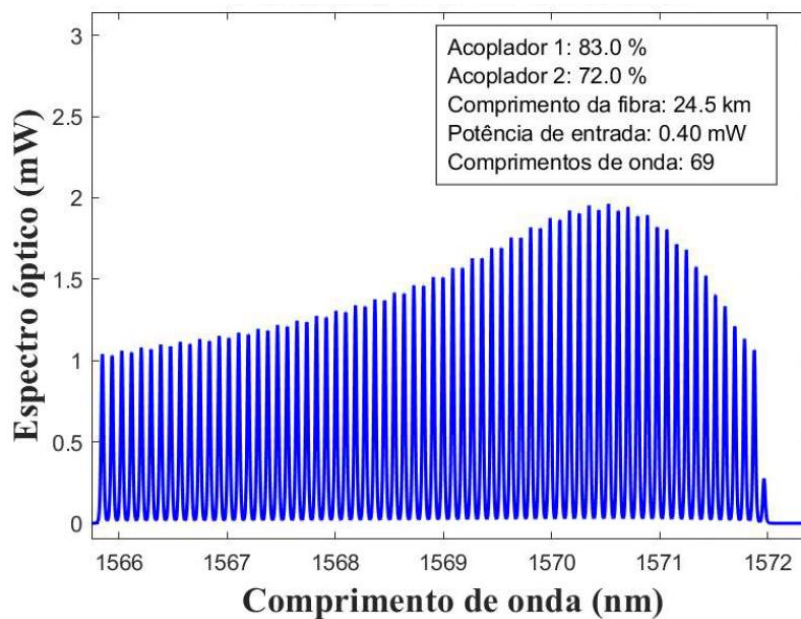
#### 5.4 Busca pela Planicidade Espectral

A busca pela planicidade espectral retornou a configuração de um laser que em seu total gera 69 comprimentos de onda, onde 68 destes estão dentro do limiar de 3 dB estabelecidos. A configuração encontrada foi a seguinte:

- Acoplador 1: 83,0 %
- Acoplador 2: 72,0 %
- Comprimento da Fibra: 24,5 km
- Potência de entrada: 0,40 mW

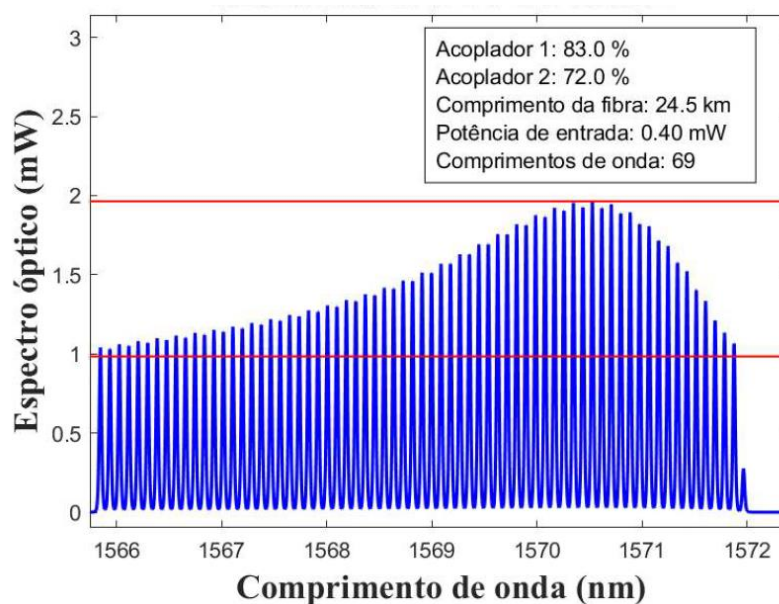
O resultado gráfico dessa configuração pode ser visto na Figura 17. A Figura 18 deixa visível os limiares de 3 dB utilizados para a contagem da quantidade de comprimentos de onda.

Figura 17 – Resultado da busca pela planicidade espectral



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 18 – Limiares para planicidade espectral



Fonte: Produzido pelo autor.

No caso mostrado, 1 comprimento de onda ficou de fora da banda de 3 dB, mas isso não é um problema, uma vez que caso haja necessidade de diminuir o espaço no espectro ocupado pelo laser, pode-se fazer uso de um filtro passa banda para ignorar as extremidades. Isso é útil porque ao usar apenas lasers cujas potências de cada comprimento de onda estejam dentro da faixa desejada de 3 dB, pode ser que a configuração gere menos comprimentos de onda totais. Assim há o aproveitamento de toda essa faixa, ignorando o que estiver fora dela.

Esse resultado mostra que nem sempre o laser com maior número de comprimentos de onda tem sua potência bem dividida pelos seus comprimentos de onda, mas que ainda assim é possível atingir uma planicidade boa com uma quantidade grande de comprimentos de onda.

## 6 CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos, é visível que há uma correlação entre as configurações dos acopladores e a quantidade de comprimentos de onda gerados. É possível também ver essa relação nos parâmetros de comprimento da fibra e da potência de entrada do sistema, levando em conta toda a dinâmica do processo do espalhamento.

Na situação experimental mostrada na Figura 6, foi utilizada a configuração com Acoplador 1 em 20%, Acoplador 2 a 19%, 25 km de fibra NZDSF com uma potência de entrada de 1 mW. Isso resultou num laser de múltiplos comprimentos de onda com 13 comprimentos de onda diferentes. Mudando apenas a potência de entrada, essa mesma configuração poderia atingir cerca de 20 comprimentos de ondas.

Alterando todos os parâmetros, seria possível obter entre 70-80 comprimentos de onda, como mostrado na Figura 9. Dependendo da necessidade, podem ser obtidos cerca de 60-70 comprimentos com planicidade espectral relativamente alta (Figura 18).

Considerando que alguns parâmetros, além dos 4 descritos, foram mantidos fixos, futuras simulações podem adicionar outros destes (conforme seção 4.5), dando mais graus de liberdade ao modelo e podendo trazer conclusões mais sólidas sobre como alterar as configurações de lasers existentes para aumentar a quantidade de comprimentos de onda gerados, ou como manter o mesmo número de comprimentos de onda, mas com melhor planicidade espectral.

Futuros trabalhos podem investigar mais a fundo a causa dos erros encontrados e solucioná-los, aprimorando o modelo de propagação do laser na fibra.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRAWAL, G. P. **Nonlinear Fiber Optics**. 5. ed. Waltham: Academic Press, 2013.
- BAO, X.; CHEN, L. Recent Progress in Brillouin Scattering Based Fiber Sensors. **Sensors**, [s. l.] v. 11, n. 4, p. 4152–4187, 7 abr. 2011. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/11/4/4152>. Acesso em: 11 nov. 2020.
- BOLOGNINI, G.; BASTIANINI, F.; SANTE, R. di.; FALCETELLI, F.; MARINI, D. Optical Fiber Sensing Cables for Brillouin-Based Distributed Measurements. **Sensors**, [s. l.], v.19, p. 1-33, 26 nov. 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/23/5172>. Acesso em: 22 nov. 2020.
- BRILLOUIN, L. Diffusion de la lumière et des rayons X par un corps transparent homogène: influence de l'agitation thermique. **Annalen de Physik**, [s. l.], v. 9, n. 17, p. 88-122, 1922. Disponível em: <https://www.annphys.org/articles/annphys/abs/1922/17/annphys19220917p88/annphys19220917p88.html>. Acesso em: 11 nov. 2020.
- CHIAO, R. Y.; TOWNES, C. H.; STOICHEFF, B. P. Stimulated Brillouin Scattering and Coherent Generation of Intense Hypersonic Waves. **Physical Review Letters**, [s. l.], v. 12, p. 592-595, 25 maio 1964. Disponível em: <https://sci-hub.do/10.1103/PhysRevLett.12.592>. Acesso em: 10 nov. 2020.
- GÖKHAN, F. S.; GÖKTAŞ, H. Analytical approach to calculate the gain of Brillouin fiber amplifiers in the regime of pump depletion. **Applied Optics**, [s. l.], v. 58, p. 7628-7635, 2019. Disponível em: <https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-58-27-7628>. Acesso em: 11 maio 2021.
- KURASHIMA, T.; HORIGUCHI, T.; TATEDA, M. Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers. **Optics Letters**, [s. l.], v. 15, n. 18, p. 1038 - 1040, 15 set. 1990. Disponível em: <https://sci-hub.do/10.1364/OL.15.001038>. Acesso em: 11 nov. 2020.
- PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas de pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Freevale, 2013.
- SILVA, E. P.; PEREIRA, K.; MARTINS, G. R.; NASCIMENTO JUNIOR, V.; REIS, L. B.; CASTELLANI, C. E. S. Low Threshold and Highly Efficient All Fiber Brillouin Laser *In*: SBMO/IEEE MTT-S INTERNATIONAL MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE, 2019, Aveiro. **Anais**. [s. l.], IEEE *Xplore*, 26 mar. 2021, p. 1-3. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9317648>. Acesso em: 16 maio 2021.
- SILVA, K. C. Q. **Utilização do Espalhamento Brillouin Estimulado na construção de um laser híbrido de fibra de Érbio e de Brillouin com múltiplos comprimentos de onda**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2020. Disponível em:



[http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese\\_12126\\_Disserta%E7%E3o%20de%20Mestrado%20-%20Kaio%20C%E9sar%20Quemelli%20da%20Silva.pdf](http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_12126_Disserta%E7%E3o%20de%20Mestrado%20-%20Kaio%20C%E9sar%20Quemelli%20da%20Silva.pdf). Acesso em: 19 out. 2020.

SILVA, L. C. B.; SILVA, E. P.; AUDIBERT, F. R.; CASTELLANI, C. E. S. Simulation solution for single and cascaded multi-wavelength Brillouin fiber lasers based on an analytical model. **Optical Fiber Technology**, [s. l.], v. 59, n. 102317, p 1 - 6, 16 jul. 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1068520020303072>. Acesso em: 19 out. 2020.

TANG, C. L. Saturation and spectral characteristics of the Stokes emission in the stimulated Brillouin process. **Journal of Applied Physics**, [s. l.], v. 37, n. 8, p. 2945-2955, 18 fev. 1966. Disponível em: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1703144>. Acesso em 3 mar. 2021.

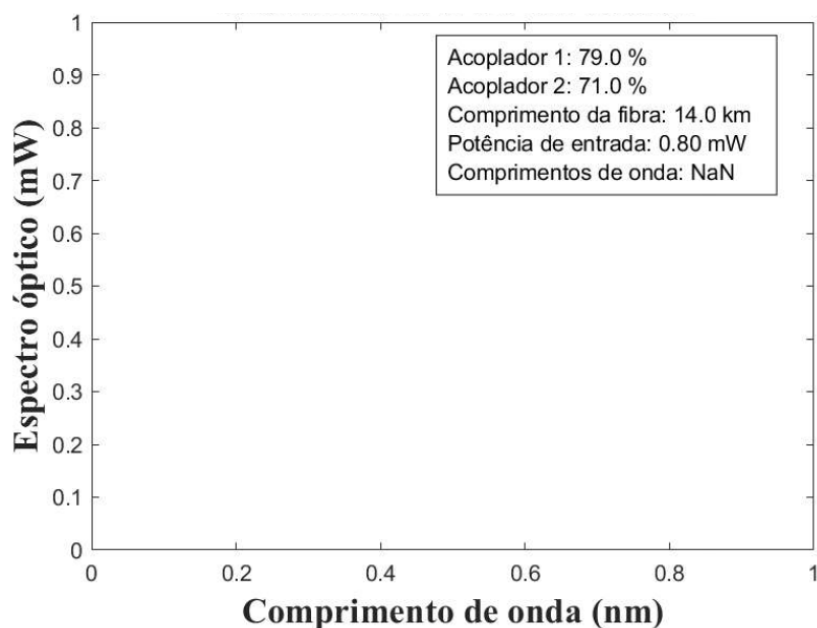
YAKOVLEV, V. V.; TRAVERSO, A. J.; BALLMAN, C. W.; TROYANOVA-WOOD, M. A.; MENG, Z. Seeing cells in a new light: a renaissance of Brillouin spectroscopy. **Advances in Optics and Photonics**, [s. l.], v. 8, p. 300-327, 2016. Disponível em: <https://scihub.do/10.1364/AOP.8.000300>. Acesso em: 16 nov. 2020.

## APÊNDICE A – EFEITO DO TRATAMENTO DE ERROS

Esse apêndice mostra a resposta de casos escolhidos para cada tipo de erro catalogado à alteração feita no tratamento de erros (conforme seção 4.6.2). As configurações escolhidas dos parâmetros foram tais que na primeira busca apresentaram erro e na segunda busca não apresentaram erro. As Figuras 19 a 30 mostram os seus antes e depois de forma gráfica, para facilitar a comparação.

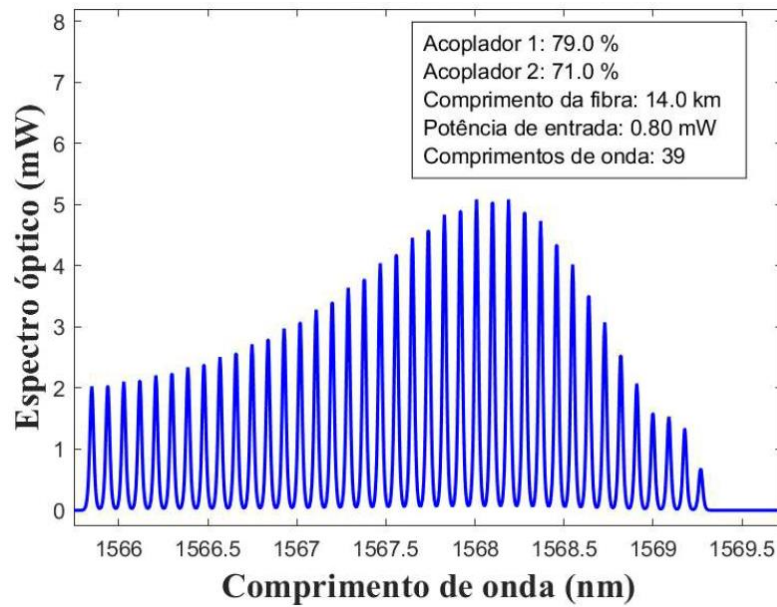
O primeiro caso a ser discutido é o resultado NaN. Aqui não houve reposta gráfica pelo resultado encontrado não ser um número. O tratamento do erro trouxe um resultado de 39 comprimentos de onda que segue o formato que foi visto nos resultados otimizados. Isso pode ser visto nas Figuras 19 e 20.

Figura 19 – Erro tipo 1 - Antes



Fonte: Produzido pelo autor.

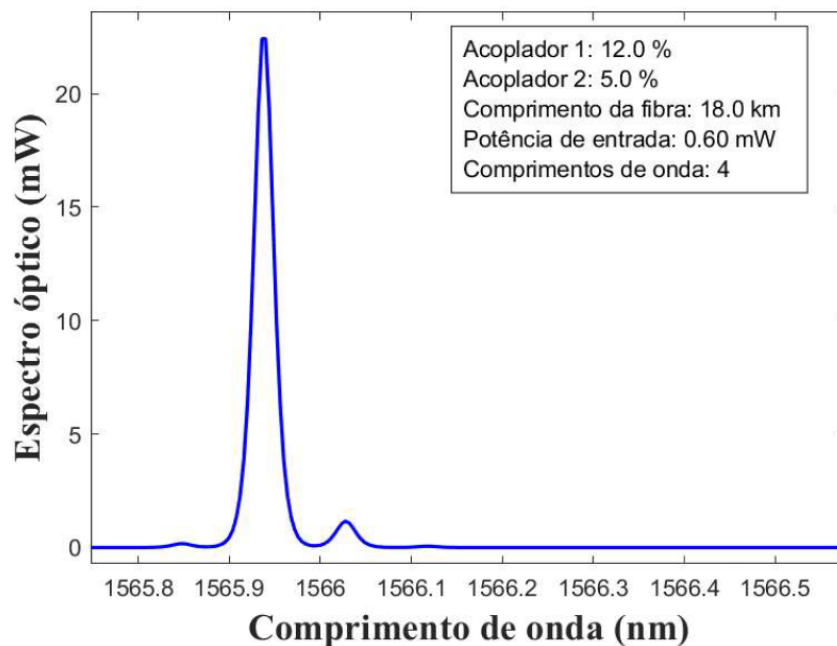
Figura 20 – Erro tipo 1 - Depois



Fonte: Produzido pelo autor.

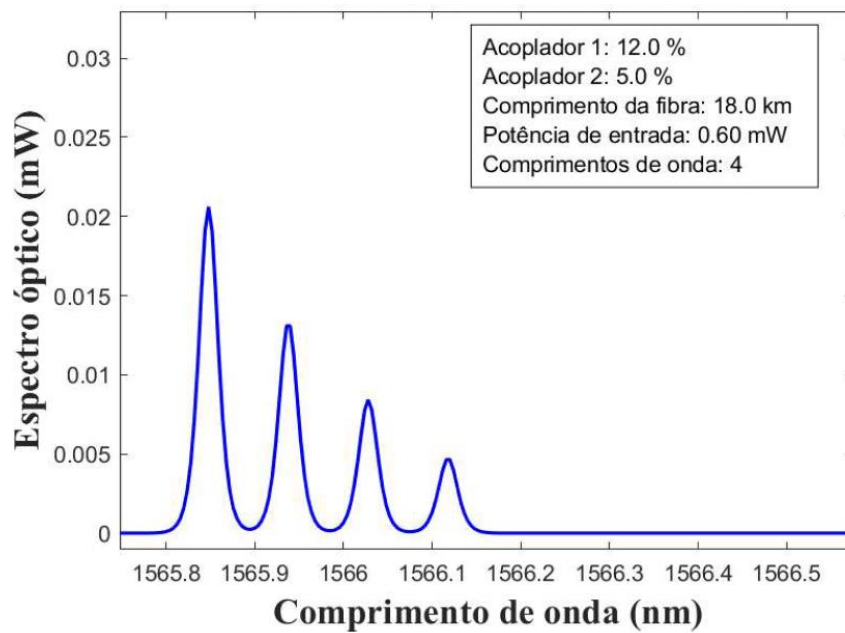
No caso das altas potências (Figura 21), pode-se ver que o segundo comprimento de onda é imensamente maior do que o primeiro gerado (da ordem de 100 vezes maior), e isso caracterizou uma incapacidade física. Depois do tratamento (Figura 22), o laser manteve a quantidade de comprimentos de onda de antes, porém agora com potências bem mais aceitáveis – da ordem de 0,01 mW.

Figura 21 – Erro tipo 2 - Antes



Fonte: Produzido pelo autor.

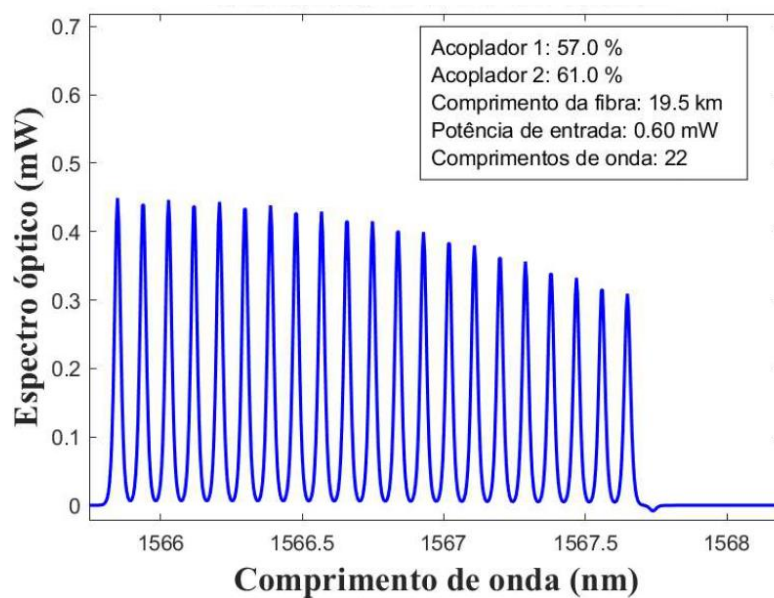
Figura 22 – Erro tipo 2 - Depois



Fonte: Produzido pelo autor.

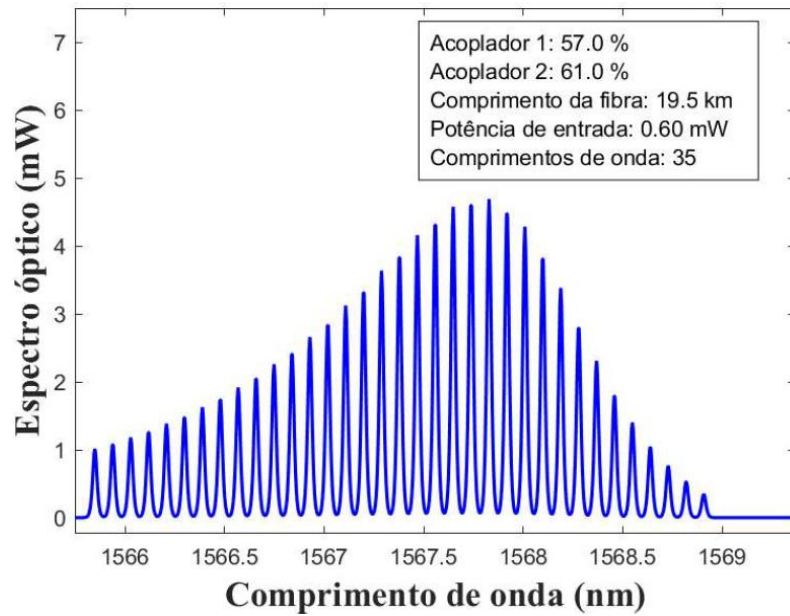
No exemplo de erro de potência negativa na Figura 23, no gráfico é visível que o último comprimento de onda é negativo, e o tratamento (Figura 24) faz uma grande diferença no formato do gráfico visto.

Figura 23 – Erro tipo 3 - Antes



Fonte: Produzido pelo autor.

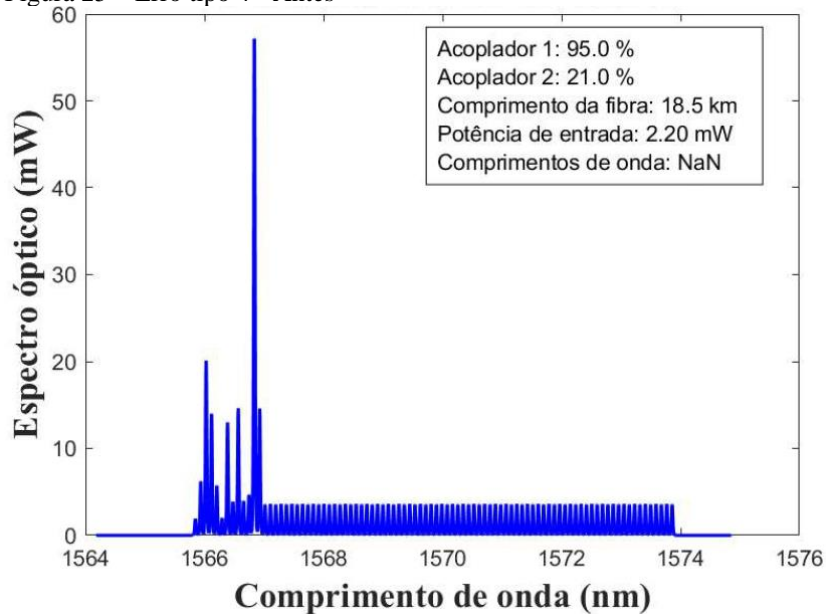
Figura 24 – Erro tipo 3 - Depois



Fonte: Produzido pelo autor.

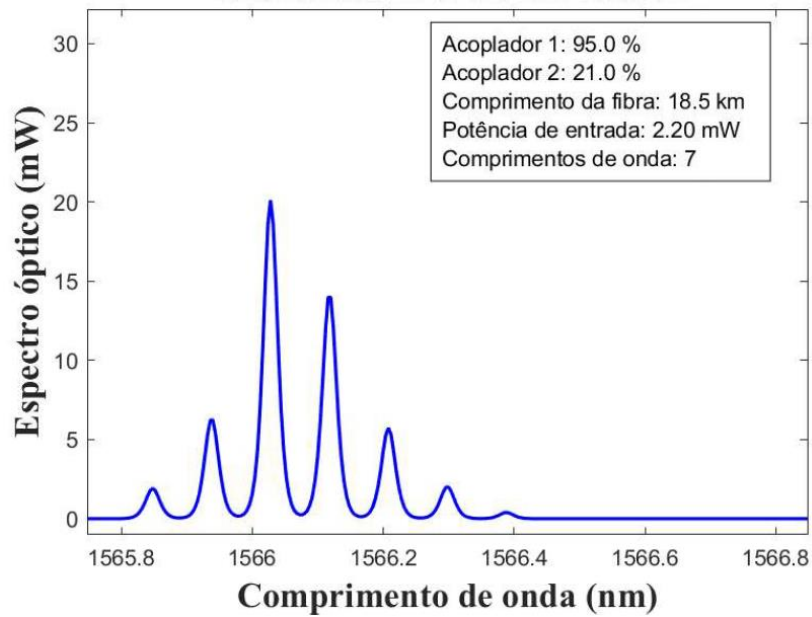
Para comprimentos de onda estagnados, a Figura 25 mostra como o laser se comporta antes do tratamento, repetindo os últimos comprimentos de onda diversas vezes com a mesma potência. Após o tratamento, na Figura 26, o laser se comporta de forma bem mais controlada.

Figura 25 – Erro tipo 4 - Antes



Fonte: Produzido pelo autor.

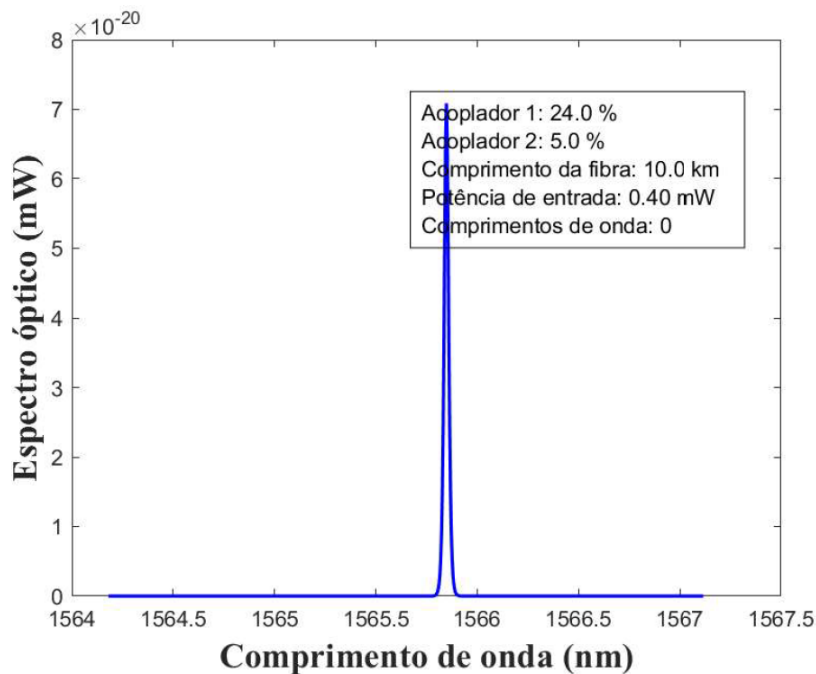
Figura 26 – Erro tipo 4 - Depois



Fonte: Produzido pelo autor.

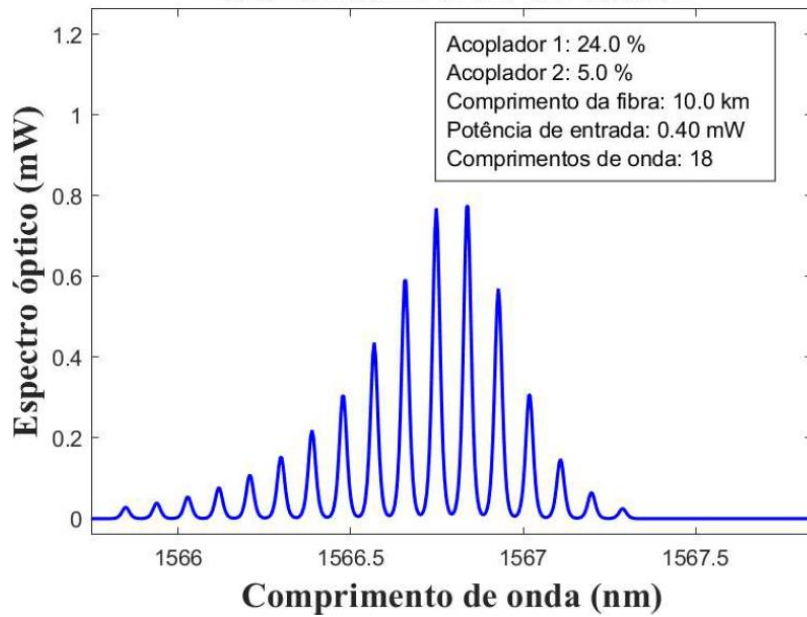
No caso de não haver nenhum comprimento de onda extra gerado, e com potências extremamente baixas (Figura 27), o problema foi resolvido após o tratamento com um formato bem mais coerente (Figura 28) com o visto em outras configurações.

Figura 27 – Erro tipo 5 - Antes



Fonte: Produzido pelo autor.

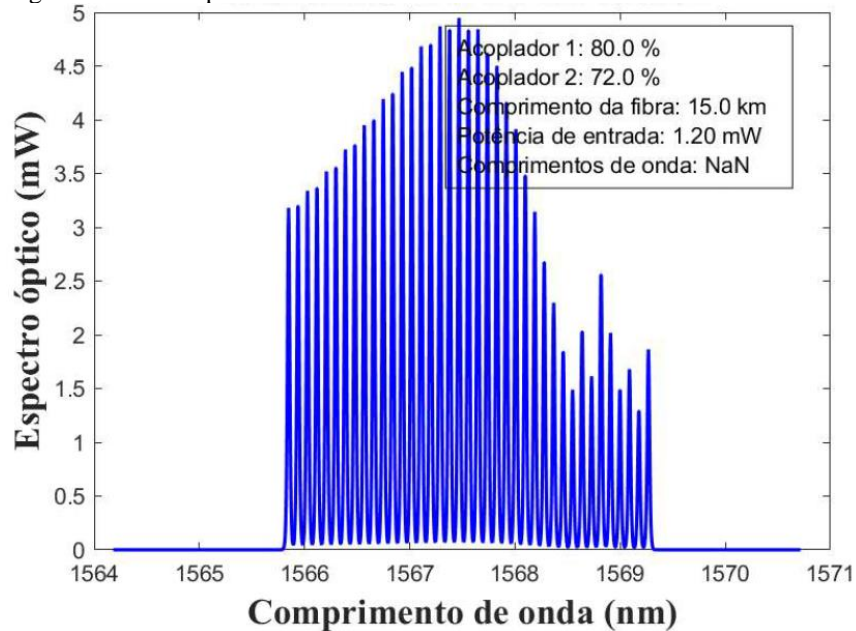
Figura 28 – Erro tipo 5 - Depois



Fonte: Produzido pelo autor.

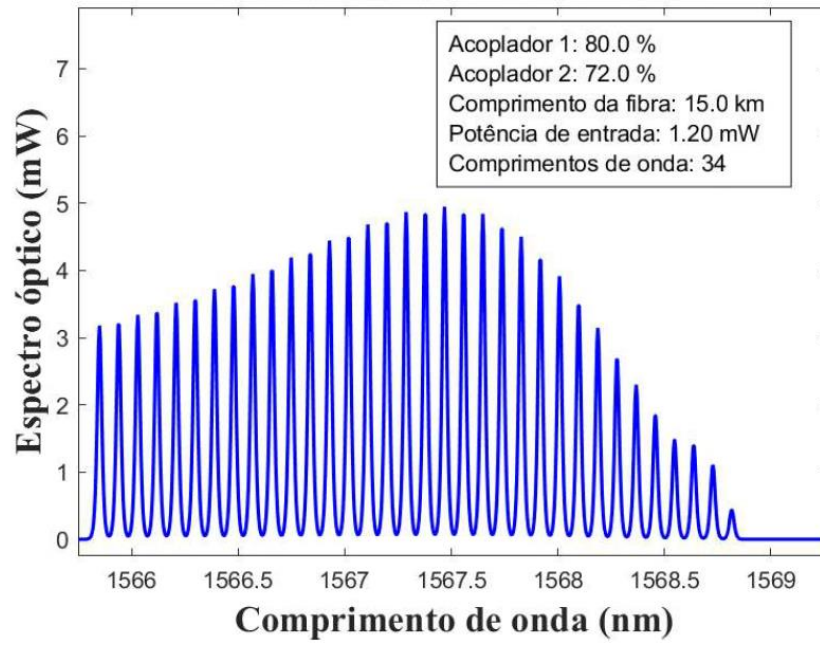
No exemplo mostrado na Figura 29, nos últimos comprimentos de onda há saltos abruptos de potência. Esse comportamento, entretanto, não é visto na Figura 30, onde houve o tratamento do erro.

Figura 29 – Erro tipo 6 - Antes



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 30 – Erro tipo 6 - Depois



Fonte: Produzido pelo autor.