



Otimização Multiobjetiva para Projeto de Amplificadores Raman

Trabalho de Conclusão de Curso
Engenharia da Computação

Aluno: Elliackin Messias do Nascimento Figueiredo

Orientador: Prof. Dr. Carmelo José Albanez Bastos Filho



Elliackin Messias do Nascimento Figueiredo

*Otimização Multiobjetiva para Projeto de
Amplificadores Raman*

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia da Computação pela Escola Politécnica de Pernambuco - Universidade de Pernambuco.

Orientador:

Prof. Dr. Carmelo José Albanéz Bastos Filho

GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO

Recife - PE, Brasil

Outubro de 2010

Resumo

Os amplificadores Raman são dispositivos capazes de propiciar o aumento da capacidade dos sistemas WDM e, conseqüentemente, atender a demanda crescente por largura de banda. Atualmente, um dos maiores desafios quando se trata desses dispositivos consiste na otimização do ganho e do *ripple* no processo de amplificação em banda larga. Para realizar essa otimização, é necessário um projeto eficiente para o amplificador, isto é, a definição correta dos comprimentos de onda e dos níveis de potência para seus *lasers* de bombeamento. A grande dificuldade na realização dessa otimização se deve à complexa interação não-linear entre sinais e bombeios provocada pelo efeito Raman. Diante disso, este trabalho desenvolveu uma ferramenta de simulação computacional para automatizar o projeto de amplificadores Raman com múltiplos bombeios. Essa ferramenta apresenta uma abordagem inovadora que consiste em utilizar um algoritmo de otimização multiobjetivo baseado em enxame de partículas para realizar a alocação dos bombeios que melhor respeita os compromissos entre ganho e *ripple*. O algoritmo utilizado foi o *Multiple Objective Particle Swarm Optimization Approach using Crowding Distance and Roulette Wheel* (MOPSO-CDR). Foram realizados experimentos de otimização de amplificadores Raman com 3, 4 e 5 *lasers* de bombeamento para validar a ferramenta. Os resultados dos experimentos mostraram que a ferramenta produziu soluções de projeto com ganho médio *on-off* em torno de 20 dB e *ripple* menor que 0,5 dB. Assim, a vantagem desta ferramenta em relação às outras abordagens presentes na literatura, é fornecer várias soluções de alto desempenho para o projetista, permitindo uma maior flexibilidade na escolha do projeto para o amplificador.

Palavras-chave: amplificadores Raman, WDM, efeito Raman, algoritmo de otimização multiobjetivo baseado em enxame de partículas, MOPSO-CDR.

Abstract

Raman amplifiers are devices that can provide the capability to increase the capacity of WDM systems and thereby meet the ever increasing demand for bandwidth. Currently, one of the major challenges concerning these amplifiers is to optimize simultaneously the gain and the ripple in the amplification bandwidth. To perform this optimization, it is necessary to design the amplifiers efficiently, i.e, one needs to define correctly the set of pumps that are responsible to transfer power to the signals. The major difficulty arises of complex nonlinear interaction between signals and pumps caused by Raman Effect. For this, we developed a computational simulation tool to design Raman amplifiers automatically. This tool presents a novel approach that uses a multi-objective particle swarm optimizer to select correctly the wavelength and its respective power to balance the trade-off between gain and ripple. The algorithm used is the Multiple Objective Particle Swarm Optimization Approach using Crowding Distance and Roulette Wheel (MOPSO-CDR). We performed the optimization of Raman amplifiers in three different scenarios, with 3, 4 and 5 pumps in order to validate the tool. The experimental results showed that the tool was able to properly design the amplifiers. Moreover, unlike others optimization approaches present in the literature, the tool presented several possibilities for building Raman amplifiers with high gain (≈ 20 dB) and low ripple ($< 0,5$ dB). The capacity to allow the designer to choose the more suitable amplifier is the main advantage of the tool.

Keywords: Raman amplifiers, WDM, Raman Effect, multi-objective particle swarm optimizer, MOPSO-CDR.

Dedicatória

À minha mãe, Mazé

Agradecimentos

*“ Fazer grandes coisas é difícil; mas comandar
grandes coisas é ainda mais difícil.”*

– **Friedrich Nietzsche**

À minha mãe, Maria José do Nascimento Figueiredo, pela boa educação a mim oferecida, os valores ensinados e pela realização deste sonho. A meu pai, Severino Guerra Figueiredo, por ter me ensinado valores como honestidade e trabalho. E ao meu irmão, Guilherme Raimundo do Nascimento Figueiredo, pela paciência e momentos agradáveis.

Ao meu orientador, Prof. Carmelo José Albanez Bastos Filho, pelas diversas cobranças e seu comprometimento como orientador. Agradeço pela oportunidade de realizar este trabalho. Ao meu orientador de Iniciação Científica, Prof. Fernando Buarque Lima Neto, pela oportunidade de participar de um projeto de pesquisa. Aproveito para agradecer também ao agora mestre Salomão Madeiro pelo companheirismo e pela oportunidade de fazer parte de seu projeto de mestrado.

Gostaria de agradecer também a todos os professores que participaram diretamente ou indiretamente da minha formação como engenheiro. Em especial, aos professores Sérgio Murilo e Thiago Massoni, pela oportunidade de participar como monitor em suas disciplinas. Agradeço também aos professores Mêuser Valença, Sérgio Campello e Wellington Pinheiro, pelo companheirismo e atenção aos alunos.

Meus agradecimentos, enfim, a todos os meus colegas de turma, em especial aos colegas Andersson Nelson, Carlos Henrique, Diego Araújo e Rafael Praxedes.

“ Não sei como pareço aos olhos do mundo, mas eu mesmo vejo-me como um pobre garoto que brincava na praia e se divertia em encontrar uma pedrinha mais lisa uma vez por outra, ou uma concha mais bonita do que de costume, enquanto o grande oceano da verdade se estendia totalmente inexplorado diante de mim.”

— ISAAC NEWTON (Memoirs of Newton)

Sumário

1	Introdução	p. 1
1.1	Perspectiva Histórica	p. 1
1.2	Projeto de Amplificadores Raman	p. 3
1.3	Solução e Objetivos	p. 5
1.3.1	Objetivos Gerais	p. 6
1.3.2	Objetivos Específicos	p. 6
1.4	Organização do Documento	p. 6
2	Amplificadores Raman	p. 7
2.1	Efeito Raman	p. 7
2.2	Amplificação Raman	p. 9
2.3	Projeto de Amplificadores Raman	p. 10
3	Otimização Multiobjetiva por Enxame de Partículas	p. 13
3.1	Otimização Multiobjetiva	p. 13
3.2	<i>Particle Swarm Optimization</i>	p. 15
3.3	Algoritmos de Otimização Multiobjetivo baseados em Enxame de Partículas	p. 18
3.3.1	Otimização Multiobjetiva por Enxame de Partículas	p. 18
3.3.2	Otimização Multiobjetiva por Enxame de Partículas usando Estratégia por Busca Cruzada	p. 19
3.3.3	Otimização Multiobjetiva por Enxame de Partículas utilizando Análise de Densidade e Seleção por Roleta	p. 20

3.4	Métricas para Avaliar Algoritmos de Otimização Multiobjetivo	p. 22
4	Experimentos	p. 24
4.1	Arranjo Experimental	p. 24
4.2	O Simulador Analítico	p. 26
5	Resultados	p. 28
5.1	Resultados para 3 <i>lasers</i> de bombeamento	p. 28
5.2	Resultados para 4 <i>lasers</i> de bombeamento	p. 32
5.3	Resultados para 5 <i>lasers</i> de bombeamento	p. 34
5.4	Discussão dos resultados	p. 37
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	p. 39
	Referências	p. 41

Lista de Figuras

1	Interações entre o fóton incidente e a molécula.	p. 8
2	Perfil do ganho Raman normalizado para a fibra de sílica [21].	p. 10
3	Amplificador Raman na configuração co-propagante [10].	p. 11
4	Amplificador Raman na configuração contra-propagante [10].	p. 12
5	Amplificador Raman na configuração bi-direcional [10].	p. 12
6	Exemplo de relação de dominância e de <i>Pareto front</i> em um processo de minimização em um espaço com dois objetivos, f_1 e f_2	p. 15
7	Exemplo de movimento de uma partícula em um espaço de busca com 2 dimensões no PSO.	p. 17
8	Seleção dos líderes das partículas no CSS-MOPSO em um espaço com 2 objetivos.	p. 20
9	Comunicação entre o MOPSO-CDR e o Simulador Analítico.	p. 25
10	Evolução dos <i>Pareto fronts</i> para o amplificador Raman com 3 <i>lasers</i> de bombeamento.	p. 29
11	Ganho dos canais determinado pelo Simulador Analítico para o amplificador Raman com 3 <i>lasers</i> de bombeamento.	p. 31
12	Ganho on-off dos canais determinado pelo Simulador Analítico para o amplificador Raman com 3 <i>lasers</i> de bombeamento.	p. 31
13	Evolução dos Pareto fronts para o amplificador Raman com 4 <i>lasers</i> de bombeamento.	p. 32
14	Ganho dos canais determinado pelo Simulador Analítico para o amplificador Raman com 4 <i>lasers</i> de bombeamento.	p. 34
15	Ganho <i>on-off</i> dos canais determinado pelo Simulador Analítico para o amplificador Raman com 4 <i>lasers</i> de bombeamento.	p. 34

16	Evolução dos Pareto fronts para o amplificador Raman com 5 <i>lasers</i> de bombeamento.	p. 35
17	Ganho dos canais determinado pelo Simulador Analítico para 5 <i>lasers</i> de bombeamento.	p. 36
18	Ganho <i>on-off</i> dos canais determinado pelo Simulador Analítico para 5 <i>lasers</i> de bombeamento.	p. 37
19	<i>Pareto fronts</i> finais para os amplificadores Raman com 3, 4 e 5 <i>lasers</i> de bombeamento.	p. 38
20	Parte dos <i>Pareto fronts</i> finais para os amplificadores Raman com 3, 4 e 5 <i>lasers</i> de bombeamento.	p. 38

Lista de Tabelas

1	Representação da partícula utilizada na otimização de um amplificador Raman com 3 <i>lasers</i> de bombeamento.	p. 26
2	Métricas dos <i>Pareto fronts</i> para o amplificador Raman com 3 <i>lasers</i> de bombeamento.	p. 28
3	Comprimentos de onda e potências dos 3 <i>lasers</i> de bombeamento associados com a solução escolhida.	p. 30
4	Métricas dos <i>Pareto fronts</i> para o amplificador Raman com 4 <i>lasers</i> de bombeamento.	p. 33
5	Comprimentos de onda e potências dos 4 <i>lasers</i> de bombeamento associados com a solução escolhida.	p. 33
6	Métricas dos <i>Pareto fronts</i> para o amplificador Raman com 5 <i>lasers</i> de bombeamento.	p. 35
7	Comprimentos de onda e potências dos 5 <i>lasers</i> de bombeamento associados com a solução escolhida.	p. 36

Lista de Acrônimos

ASE *Amplified Spontaneous Emission*

CSS-MOPSO *Cross-Searching Strategy for Multi-objective Particle Swarm Optimization*

EDFA *Erbium Doped Fiber Amplifiers*

MOPSO-CDR *Multiple Objective Particle Swarm Optimization Approach using Crowding Distance and Roulette Wheel*

MOPSO *Multi-Objective Particle Swarm Optimization*

OSNR *Optical Signal-to-Noise Ratio*

PSO *Particle Swarm Optimization*

SRS *Stimulated Raman Scattering*

WDM *Wavelength Division Multiplexing*

1 *Introdução*

“ ‘Begin at the beginning,’ the King said, gravely,
‘and go on till you come to the end: then stop.’”

– Lewis Carroll

Nesta monografia, foi proposta pela primeira vez e demonstrada a utilização de um algoritmo de otimização multiobjetivo baseado em enxame de partículas no projeto de amplificadores Raman banda larga. A partir da pesquisa realizada neste trabalho, foi desenvolvida uma ferramenta de simulação computacional para auxiliar os engenheiros no projeto desses dispositivos. Por meio dessa ferramenta, é possível projetar amplificadores Raman de alto ganho e com baixo *ripple* para sistemas de comunicação óptica de alta capacidade.

Este capítulo apresenta a introdução deste documento, e está organizado em 4 seções. Na Seção 1.1, é apresentado um breve histórico sobre as origens do amplificador Raman. Na Seção 1.2, é discutida a motivação para realização deste trabalho e o problema abordado. Em seguida, na Seção 1.3, são apresentados os objetivos gerais e específicos. Por fim, este capítulo é encerrado na Seção 1.4, que descreve a estrutura geral deste documento.

1.1 **Perspectiva Histórica**

Em 1928, o físico indiano C. V. Raman publicou um artigo na revista *Nature* em que descrevia um novo tipo de espalhamento da luz [1]. Por esta descoberta, Raman foi agraciado com o prêmio Nobel de Física em 1930, e o fenômeno do espalhamento da luz por ele observado foi denominado de efeito Raman em sua homenagem. Em seus experimentos, Raman observou o espalhamento da luz solar provocado por líquidos e gases, e verificou que a luz espalhada apresentava componentes de frequência diferentes da radiação original.

A versão estimulada do efeito Raman conhecido como espalhamento Raman estimulado (**SRS** - *Stimulated Raman Scattering*) [2] [3] foi descoberto por Woodbury em 1962, a partir de experimentos com *laser* de rubi operando no modo refletor pulsado [4]. Em suas investigações, Woodbury observou a existência de emissão estimulada em torno de 7670 Å acompanhada da emissão normal em 6943 Å do *laser* de rubi, e percebeu que a potência em 7670 Å era aproximadamente um quinto da potência em 6943 Å.

Em 1971, Stolen e colaboradores demonstraram pela primeira vez a existência do SRS em fibras de vidro [5]. No ano de 1972, Stolen e Ippen mediram um pequeno ganho Raman em um sinal ao longo de uma fibra monomodo de 590 cm com núcleo de 3,8 μm de diâmetro utilizando um bombeio (feixe de luz) com comprimento de onda de 526 nm [6]. Nesse trabalho, eles demonstraram a viabilidade da utilização do SRS no processo de amplificação óptica, fenômeno que ficou conhecido como amplificação Raman.

Em meados da década de 1980, foram estudadas as vantagens da amplificação Raman, elucidando a promessa da construção dos amplificadores Raman [7]. Apesar desse desenvolvimento inicial, a falta de tecnologia apropriada, como *lasers* de alta potência a preços acessíveis, e o surgimento do amplificador a fibra dopada por Érbio (**EDFA** - *Erbium Doped Fiber Amplifiers*) contribuíram para o atraso no desenvolvimento desses dispositivos.

Com o desenvolvimento de *lasers* de alta potência em meados da década de 90, ressurgiu o interesse pelos amplificadores Raman. O interesse na construção desses dispositivos se deve às muitas vantagens fundamentais oferecidas por eles. Em primeiro lugar, a amplificação Raman ocorre em qualquer tipo de fibra óptica, o que representa uma vantagem econômica para as companhias de telecomunicações que não precisam investir na compra de fibras ópticas especiais. Em segundo lugar, essa amplificação apresenta baixa figura de ruído. Por último, a terceira vantagem é que o espectro do ganho Raman pode ser ajustado de acordo com a escolha dos comprimentos de onda dos bombeios utilizados no amplificador Raman [8].

A possibilidade de ajustar o espectro do ganho é uma das características mais importantes do amplificador Raman. Devido a essa característica é possível desenvolver amplificadores banda larga, isto é, dispositivos capazes de fornecer ganho a sinais dentro de uma faixa ampla de comprimentos de onda. Além disso, o amplificador Raman é capaz de diminuir o *ripple* dos ganhos obtidos pelos sinais. O *ripple* consiste na maior diferença de ganho entre os sinais amplificados, e representa o nivelamento dos ganhos obtidos pelos sinais. Desta forma, devido a esta característica, foi possível desenvolver, em 1999, um

amplificador Raman com doze bombeios que proporcionou 1 dB de *ripple* em uma largura de banda de sinais de 100 nm [9].

No início do ano 2000, praticamente todos os sistemas de transmissão por fibra óptica de médio (300 a 800 km) e longo (acima de 800 km) alcance usavam amplificadores Raman [8]. Recentemente, eles se tornaram um dos dispositivos ópticos mais comercializados pela indústria de telecomunicações. Essa situação está motivando o desenvolvimento de várias pesquisas para investigar as características e potencialidades desses amplificadores [7]. E, atualmente, esses dispositivos constituem um dos tópicos de pesquisa mais importantes e desafiadores no contexto dos sistemas de comunicações ópticas [7].

1.2 Projeto de Amplificadores Raman

Um dos grandes problemas na utilização da fibra óptica como enlace de longo alcance é a atenuação do sinal durante sua transmissão. Nos primeiros sistemas ópticos, esse problema foi resolvido com a utilização dos regeneradores optoeletrônicos, dispositivos que realizavam a amplificação do sinal no domínio elétrico. O regenerador optoeletrônico converte o sinal óptico em sinal elétrico, recupera e amplifica o sinal, e então converte-o novamente para o domínio óptico para, em seguida, transmiti-lo por outra fibra óptica. Entretanto, com o advento da tecnologia de multiplexação em comprimento de onda (**WDM** - *Wavelength Division Multiplexing*), na qual vários canais com comprimentos de onda distintos são transmitidos pela mesma fibra óptica, as taxas de transmissão dos sistemas ópticos aumentaram significativamente, fazendo com que os circuitos dos regeneradores se tornassem caros e complexos. Esses sistemas exigiam que houvesse um regenerador para cada comprimento de onda transmitido pela fibra óptica, o que tornou os custos com regeneradores muito elevados [10]. Essa situação motivou a pesquisa e o desenvolvimento dos amplificadores ópticos.

O amplificador óptico é um dispositivo que realiza a amplificação do sinal no domínio óptico. Isto significa que ele é capaz de amplificar o sinal óptico que propaga pela fibra óptica sem precisar convertê-lo em sinal elétrico, como acontecia nos regeneradores optoeletrônicos. Existem diversas tecnologias de amplificadores ópticos, as principais são: o EDFA [11] e o amplificador Raman [12].

O EDFA foi o primeiro amplificador a ser comercializado e permitiu atender a demanda do mercado de telecomunicações causada pelo surgimento da Internet, na primeira metade dos anos 1980. Entretanto, a crescente demanda por largura de banda está

exigindo que os sistemas WDM atuais aumentem a sua banda de transmissão. Nessa perspectiva, os EDFAs estão se tornando um gargalo no aumento da capacidade dos sistemas ópticos, pois os EDFAs convencionais operam principalmente na *Banda C* [8] [13]. Diante disso, o interesse pelos amplificadores Raman aumentou significativamente, devido ao fato deles permitirem uma maior flexibilidade na escolha da banda de transmissão por meio do ajuste de sua curva de ganho. Além disso, os amplificadores Raman apresentam outras vantagens em relação aos EDFAs, como a capacidade de proporcionar ganho em uma banda larga de comprimentos de onda e a capacidade de utilizar a própria fibra instalada para compensar as perdas. Essas características permitem aos amplificadores Raman aumentar a capacidade dos sistemas WDM ao mesmo tempo em que não exige nenhum custo adicional com fibras especiais. Além dessas vantagens, os amplificadores Raman têm as seguintes características:

- apresentam baixa figura de ruído, em que a figura de ruído é uma medida da degradação da relação sinal-ruído devido a um dispositivo;
- fornecem ganhos moderados na banda de sinais amplificada — ganhos elevados podem produzir efeitos não-lineares que distorcem os sinais;
- têm a capacidade de nivelar os ganhos dos sinais amplificados. Dependendo da alocação dos bombeios (potência e comprimento de onda), os amplificadores Raman podem equalizar os ganhos alcançados pelos sinais, característica importante para os sistemas WDM.

Apesar das vantagens dos amplificadores Raman, o principal desafio encontrado na utilização desses amplificadores consiste na otimização do ganho e do *ripple* da curva de ganho desses dispositivos para uma banda larga de sinais. Essa otimização depende de um projeto eficiente para o amplificador Raman, ou seja, da definição correta dos comprimentos de onda e das potências dos bombeios que compõe o amplificador. Entretanto, realizar esta otimização é uma tarefa complexa, devido à interação não-linear entre sinais e bombeios provocada pelo efeito Raman. Além disso, o ganho e o *ripple* são objetivos conflitantes, o que significa que ao se melhorar o ganho obtido pelo amplificador, o *ripple* alcançado pode ser comprometido.

Existem alguns trabalhos na literatura que propõem métodos para a otimização do ganho e do *ripple* em amplificadores Raman. A maioria deles utilizam métodos de otimização globais. Em [14], é utilizado o algoritmo *Simulated annealing* para realizar essa otimização. Em [15], uma rede neural é utilizada. E em [16], um esquema baseado em uma

combinação de otimização por enxame de partículas (**PSO** - *Particle Swarm Optimization*) com algoritmo genético é empregado. Entretanto, apesar da natureza multiobjetiva desse problema, nenhuma das técnicas pesquisadas utiliza um algoritmo multiobjetivo para realizar a otimização simultânea do *ripple* e do ganho.

Diferentemente dos métodos de otimização globais [17], os algoritmos multiobjetivos [17] [18] apresentam a vantagem de encontrar o conjunto de soluções que melhor respeita os compromissos entre os objetivos otimizados. Essa característica é bastante apropriada para o problema abordado, pois oferece ao projetista várias soluções de projeto para o amplificador, de modo que ele tem a possibilidade de escolher a solução que melhor atende as suas necessidades e critérios. Com isso, ele pode escolher uma solução de projeto que corresponde a um amplificador de alto ganho e de baixo *ripple*, por exemplo.

Dentre os algoritmos de otimização multiobjetivo, os algoritmos baseados em enxame de partículas apresentam boa eficácia na busca por soluções e rápida convergência. Além disso, esses algoritmos são bastante apropriados para problemas com variáveis contínuas, como é o caso do problema abordado. Desta forma, a utilização desses algoritmos no projeto de amplificadores Raman se mostra bastante promissora.

1.3 Solução e Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi propor e demonstrar pela primeira vez a aplicação de um algoritmo de otimização multiobjetivo no projeto de amplificadores Raman. Para isso, foi desenvolvida uma ferramenta de simulação computacional para realizar automaticamente a otimização do ganho e do *ripple* da curva de ganho por meio da seleção apropriada dos comprimentos de onda e dos níveis de potência dos bombesios do amplificador. É importante destacar que este trabalho envolve apenas o projeto de amplificadores Raman distribuídos na configuração contra-propagante. Para realizar a otimização, essa ferramenta utiliza um algoritmo de otimização multiobjetivo baseado em enxame de partículas chamado Otimização Multiobjetiva por Enxame de Partículas utilizando Análise de Densidade e Seleção por Roleta (**MOPSO-CDR** - *Multiple Objective Particle Swarm Optimization Approach using Crowding Distance and Roulette Wheel*) [19].

A ferramenta desenvolvida apresenta uma vantagem importante em relação a outras abordagens propostas na literatura. Enquanto essas abordagens encontram apenas uma única solução para a alocação dos bombesios, a ferramenta proposta oferece ao projetista várias soluções de projeto de amplificadores Raman otimizados. Desta forma, o projetista

pode escolher uma das soluções de projeto de acordo com as suas necessidades e critérios. Nas subseções a seguir, são apresentados os objetivos gerais e específicos deste trabalho.

1.3.1 Objetivos Gerais

- Desenvolver uma ferramenta de simulação computacional para auxiliar os engenheiros no projeto de amplificadores Raman otimizados.
- Realizar a otimização de amplificadores Raman para uma banda de sinais específica com o auxílio da ferramenta.
- Publicar artigos sobre o tema em conferências sobre sistemas de comunicação óptica.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudar e implementar alguns algoritmos de otimização multiobjetivo propostos na literatura. E, em seguida, selecionar um dos algoritmos estudados segundo um conjunto de métricas.
- Analisar o código do Simulador Analítico — o Simulador Analítico é uma ferramenta computacional utilizada para computar o ganho e o *ripple* fornecido para uma banda de sinais.
- Implementar a comunicação entre o Simulador Analítico e o algoritmo multiobjetivo escolhido.
- Realizar a validação da ferramenta por meio da otimização de amplificadores Raman distribuídos na configuração contra-propagante com 3, 4 e 5 *lasers* de bombeamento.

1.4 Organização do Documento

Este documento está organizado em 6 capítulos. O Capítulo 2 introduz a fundamentação teórica sobre amplificadores Raman necessária para desenvolver o tema proposto. Em seguida, no Capítulo 3, é apresentado o embasamento teórico sobre algoritmos de otimização multiobjetivo baseados em enxame de partículas. O Capítulo 4 descreve o arranjo experimental necessário para validar o projeto desenvolvido neste trabalho. No Capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações realizadas. Este trabalho é encerrado no Capítulo 6, no qual são discutidas as principais conclusões deste trabalho, e são apresentadas propostas de trabalhos futuros.

2 *Amplificadores Raman*

“ *La lumière est le personnage principal dans le tableau.*”

– **Claude Monet**

Neste capítulo, é apresentada a fundamentação teórica necessária para entender o fenômeno da amplificação Raman e como ele pode ser utilizado para transformar a fibra óptica em um amplificador óptico banda larga. Na Seção 2.1, é descrito brevemente um tipo de espalhamento da luz conhecido como efeito Raman. Em seguida, a Seção 2.2 descreve o princípio de funcionamento da amplificação Raman. Por último, na Seção 2.3, são apresentados os aspectos envolvidos no projeto de amplificadores Raman.

2.1 Efeito Raman

Quando se incide radiação monocromática sobre alguma amostra de material, observa-se que parte dela é transmitida sem alteração e que uma pequena parcela dela é espalhada pelo material. Ao se analisar o espectro da radiação espalhada, percebe-se a presença não apenas da frequência original da radiação, mas também a presença de novas frequências. Esse fenômeno caracterizado pelo espalhamento da radiação com mudança de frequência é conhecido como efeito Raman.

No espectro da radiação espalhada, as novas frequências são denominadas bandas Raman e juntas constituem um espectro Raman [20]. As bandas com frequências menores que a frequência incidente são chamadas de frequências Stokes, e as frequências maiores que a frequência incidente são denominadas de frequências anti-Stokes.

As propriedades do efeito Raman podem ser mais bem entendidas por meio dos conceitos da mecânica quântica e pelo princípio da conservação da energia. As moléculas de uma determinada substância podem vibrar apenas em frequências bem definidas. Essas frequências são determinadas pelos níveis de energia que a molécula pode assumir, como mostra a Figura 1(a). Nessa figura, o estado de energia E_0 corresponde ao estado fun-

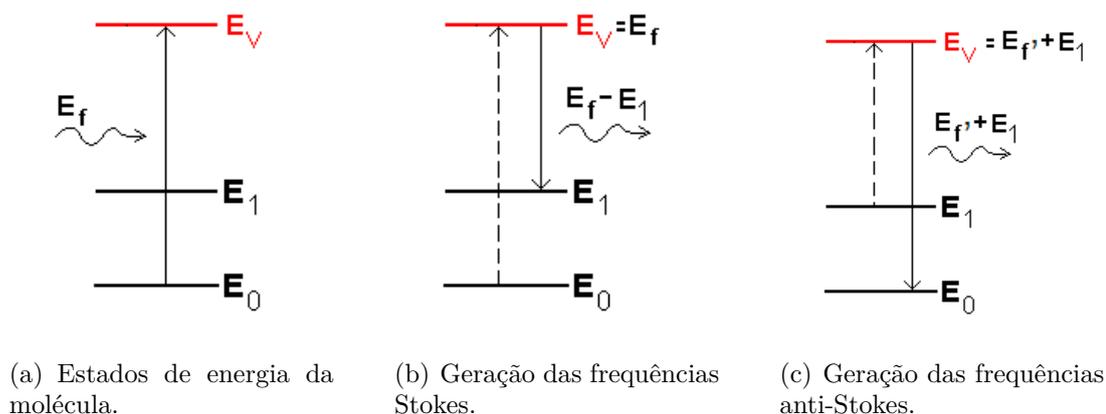


Figura 1: Interações entre o fóton incidente e a molécula.

damental de mínima energia vibracional, enquanto o nível E_1 representa um estado de maior energia vibracional. O estado E_V é um estado virtual, ou seja, é um estado de energia meta-instável. Neste exemplo, é assumido que $E_0 = 0$.

Quando um fóton com energia $E_f = E_V$ incide sobre uma molécula no estado E_0 , este fóton é absorvido pela molécula, que passa do estado de vibração E_0 para o estado de vibração E_V . Como o estado virtual E_V é um estado instável, a molécula decai para um dos seus estados de vibração com energia menor que E_V . Caso a molécula volte para seu estado inicial E_0 , ela emite um fóton com a mesma energia do fóton incidente. Por outro lado, caso a molécula vá para o estado E_1 , parte da energia do fóton é transferida para a molécula na forma de vibração, e um fóton de energia $E_f - E_1$ é emitido. Como o fóton emitido tem uma energia menor que o fóton original, ele se propaga com uma frequência menor que a do fóton original, produzindo, assim, as frequências Stokes (ver Figura 1(b)).

Em outra situação, pode ocorrer de um fóton de energia $E_{f'}$ incidir sobre uma molécula previamente excitada em um estado E_1 . Neste caso, a molécula passa do estado E_1 para o estado virtual E_V e, em seguida, decai para o estado E_0 . Com isso, a molécula cede energia para o fóton, que passa a se propagar com uma frequência maior que a do fóton original, produzindo, desta forma, as frequências anti-Stokes (ver Figura 1(c)). As frequências anti-Stokes são menos intensas que as frequências Stokes, pois, no equilíbrio térmico, a população de moléculas no estado fundamental é muito maior que população de moléculas excitadas em um estado de maior energia [20].

Existem dois tipos de efeito Raman: o espontâneo e o estimulado. A luz espalhada pelo efeito Raman espontâneo apresenta uma intensidade bastante fraca. Na propagação de um feixe de luz através de um 1 cm de algum meio material, por exemplo, aproximadamente

10^{-6} da radiação incidente é espalhada em frequências Stokes [12] [20]. Entretanto, ao se incidir um feixe de luz intenso sobre alguma amostra material, pode ocorrer um espalhamento altamente eficiente como resultado da versão estimulada do efeito Raman, conhecido como espalhamento Raman estimulado (**SRS** - *Stimulated Raman Scattering*). O SRS é um processo mais intenso que o espalhamento espontâneo: 10 % ou mais da energia da luz incidente é convertido em frequências Stokes [20].

2.2 Amplificação Raman

O SRS pode ser utilizado na amplificação de um sinal óptico ao longo da fibra óptica. Para isso, utiliza-se outro sinal óptico com uma frequência maior e de alta potência chamado de bombeio. Quando o sinal óptico se propaga simultaneamente com o bombeio na mesma fibra óptica, o bombeio transfere parte de sua potência para o sinal, devido ao efeito Raman. Enquanto se propaga pela fibra óptica, o bombeio emite fótons na mesma frequência que a do sinal transmitido, e, conseqüentemente, esse sinal aumenta a sua energia e se torna mais intenso. O aumento da intensidade do sinal óptico ao longo da fibra óptica é o que caracteriza a amplificação Raman, fenômeno que pode ser utilizado para contornar o problema da atenuação do sinal pela fibra óptica.

Para que um sinal seja amplificado, é necessário que a sua frequência seja igual a um das frequências Stokes que constituem o espectro Raman da fibra óptica. Neste sentido, as propriedades físicas da fibra de sílica são de fundamental importância para o processo de amplificação Raman em sistemas ópticos com múltiplos canais. Por causa de sua natureza amorfa, a fibra de sílica apresenta um espectro Raman largo e com frequências distribuídas quase continuamente, o que permite amplificar uma grande quantidade de sinais. A Figura 2 ilustra o perfil do ganho Raman normalizado das frequências de Stokes em função do desvio em frequência para a fibra de sílica. O ganho Raman representa a parcela da potência do bombeio que é transferida para o sinal, e o desvio em frequência representa a diferença entre a frequência do sinal e a frequência do bombeio. Nessa figura, observa-se que o ganho Raman apresenta duas curvas, uma para luz polarizada paralelamente (co-polarizada) e outra para a luz polarizada perpendicularmente à luz de bombeio. Como se pode notar, o ganho Raman em fibras de sílica se estende sobre uma faixa larga de 40 THz, com um pico largo e dominante próximo à 13 THz. Desta forma, para se fornecer ganho máximo para um sinal, a diferença entre a frequência do bombeio e a frequência deste sinal deve ser de aproximadamente 13 THz.

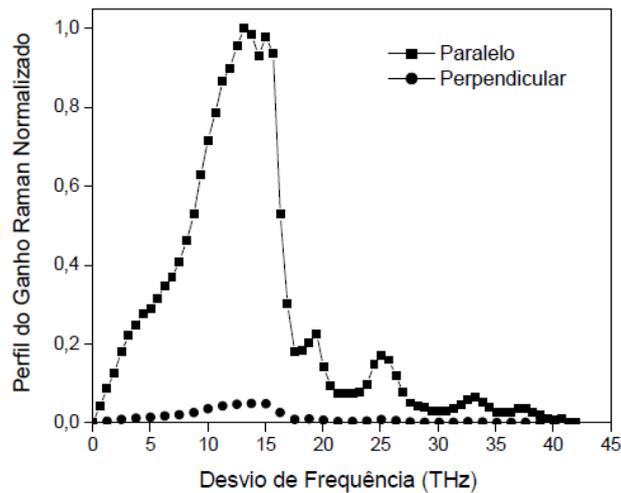


Figura 2: Perfil do ganho Raman normalizado para a fibra de sílica [21].

2.3 Projeto de Amplificadores Raman

Um amplificador Raman é um dispositivo que utiliza o efeito da amplificação Raman para amplificar sinais ópticos ao longo da fibra óptica. Um amplificador Raman de alto desempenho a um custo competitivo necessita de um bom projeto para sua implementação. O projeto de uma amplificador Raman, por sua vez, envolve a seleção apropriada dos comprimentos de onda e dos níveis de potência dos *lasers* de bombeamento do amplificador para se obter altos valores de ganho com baixa *ripple* em uma banda larga de sinais. Além desse aspecto, outros fatores são importantes no projeto de amplificadores Raman, como o tipo do amplificador e o posicionamento dos *lasers* de bombeamento.

Existem dois tipos de amplificador Raman: o distribuído e o discreto. No amplificador distribuído, as potências dos bombeios são transferidas para os canais ao longo de toda a fibra óptica de transmissão para contrabalancear as perdas causadas pelo enlace. Já o amplificador Raman discreto é aquele cujo *laser* de bombeamento está confinado em um trecho isolado de fibra óptica de alto ganho (geralmente fibras compensadoras de dispersão) posicionado em linha com a fibra de transmissão [8] [21].

Uma das vantagens de se utilizar amplificadores distribuídos vem do fato deles apresentarem uma relação sinal ruído óptica (**OSNR** - *Optical Signal-to-Noise Ratio*) melhor que a dos amplificadores discretos. Eles são também menos suscetíveis aos efeitos não-lineares provenientes de ganhos elevados. Além disso, esses amplificadores são muito úteis quando se deseja fazer uma atualização no sistema já instalado operando com EDFAs [21].

Uma das características da amplificação Raman é que o ganho dos sinais propagantes é independente da direção de propagação entre bombeios e sinais [7]. Assim, outro aspecto importante com relação ao projeto de amplificadores Raman, é o posicionamento dos *lasers* de bombeamento na fibra óptica. Dependendo do posicionamento desses *lasers*, o amplificador Raman pode assumir três configurações: co-propagante, contra-propagante e bi-direcional.

Na configuração conhecida como co-propagante, o *laser* de bombeamento é posicionado no início da fibra óptica para que o bombeio se propague no mesmo sentido do sinal enviado pelo transmissor. A vantagem dessa configuração é que boa parte do ruído por emissão espontânea amplificada (**ASE** - *Amplified Spontaneous Emission*) é produzido logo no início da fibra, sendo atenuado durante a sua propagação ao longo do enlace. Essa característica faz com que o ruído chegue ao receptor com uma potência muito baixa, garantindo assim uma boa OSNR. A configuração co-propagante é ilustrada na Figura 3.

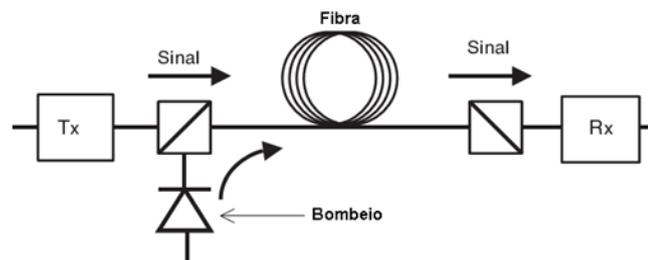


Figura 3: Amplificador Raman na configuração co-propagante [10].

Na configuração contra-propagante, conforme ilustrado na Figura 4, o *laser* de bombeamento é posicionado no final da fibra óptica junto ao receptor, para que o bombeio se propague na direção contrária ao sinal. A grande vantagem dessa configuração é que, como o sinal já chega bastante atenuado no receptor, a potência do sinal não atinge valores muito elevados, o que evita efeitos não-lineares provenientes de sinais com alta intensidade. Entretanto, a potência elevada do bombeio no final da fibra pode provocar a geração de um alto ruído ASE próximo ao receptor, o que faz com que a OSNR no receptor seja mais baixa.

Por último, a Figura 5 ilustra o amplificador bi-direcional, que consiste em posicionar os *lasers* de bombeamento nas extremidades da fibra óptica para que os bombeios se propaguem em ambas as direções. Desta forma, a configuração bi-direcional pode apre-

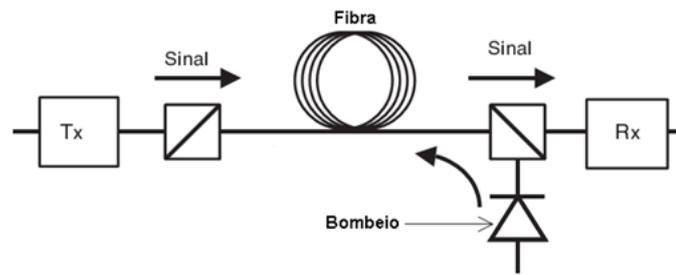


Figura 4: Amplificador Raman na configuração contra-propagante [10].

sentar a característica de boa OSNR da configuração co-propagante, juntamente com a baixa suscetibilidade à efeitos não-lineares da configuração contra-propagante. Contudo, a necessidade de se ter o dobro de *lasers* torna esta solução menos viável economicamente.

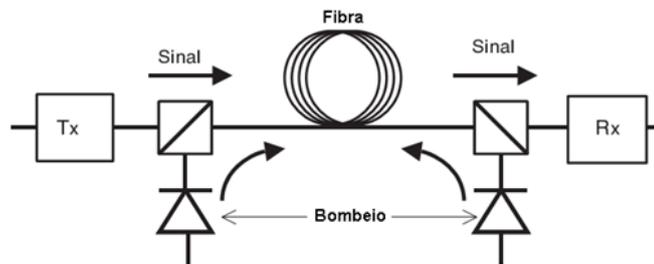


Figura 5: Amplificador Raman na configuração bi-direcional [10].

A configuração contra-propagante é frequentemente citada pela literatura como sendo a configuração mais indicada para ser implementada em amplificadores Raman em relação à configuração co-propagante, pois ela tem melhor desempenho e maior tolerância aos efeitos não-lineares, menor dependência do ganho com a polarização e menor ruído gerado pelas flutuações de potência dos bombesios [21]. Desta forma, devido as vantagens da configuração contra-propagante em relação a co-propagante, e por ela ser uma opção de menor custo em relação a configuração bi-direcional, os amplificadores Raman otimizados neste trabalho foram projetados na configuração contra-propagante.

3 *Otimização Multiobjetiva por Enxame de Partículas*

“ *Existirá alguém tão esperto que aprenda pela experiência dos outros?* ”

– **Voltaire**

Este capítulo tem como objetivo apresentar a fundamentação teórica sobre otimização multiobjetiva e sobre algoritmos multiobjetivos baseados em enxame de partículas. Na Seção 3.1, os conceitos e a terminologia sobre otimização multiobjetiva são brevemente apresentados. Na Seção 3.2, o algoritmo de otimização por enxame de partículas (**PSO** - *Particle Swarm Optimization*) é descrito e brevemente analisado. A Seção 3.3 descreve brevemente alguns algoritmos de otimização multiobjetiva baseados em enxame de partículas. Na última seção, são apresentadas algumas métricas para avaliar a qualidade de algoritmos de otimização multiobjetiva.

3.1 **Otimização Multiobjetiva**

Muitos problemas na engenharia e na ciência envolvem a otimização simultânea de vários objetivos conflitantes. Projeto de sistemas complexos de *hardware/software*, determinação da estrutura atômica de proteínas, reconhecimento de padrões na difração de raio X e ajuste de curvas são exemplos de aplicações em que dois ou mais objetivos são otimizados simultaneamente [18]. Problemas dessa natureza são conhecidos como problemas multiobjetivos.

Diferentemente dos problemas com apenas um único objetivo, que apresentam apenas uma única solução ótima, os problemas multiobjetivos apresentam um conjunto de soluções igualmente ótimas conhecido como conjunto Pareto-ótimo. Esse conjunto consiste de todas as soluções que representam o melhor compromisso entre os objetivos envolvidos no problema. Assim, uma solução pertence ao conjunto Pareto-ótimo, se não for possível

melhorar um dos objetivos sem prejudicar um dos outros objetivos restantes [22]. As soluções do Pareto-ótimo são soluções igualmente plausíveis, de modo que nenhuma solução pode ser considerada melhor que a outra.

Considere, por exemplo, o projeto de um automóvel, no qual se deseja maximizar o desempenho do veículo e, simultaneamente, minimizar o consumo de combustível. Nesse caso, um veículo com um excelente desempenho que consome muito combustível constitui uma solução tão boa quanto um veículo de baixo desempenho que consome pouco combustível. E o conjunto de soluções de projeto no qual não é possível melhorar o desempenho do automóvel sem aumentar o consumo do veículo representa o Pareto-ótimo do problema.

Um problema de otimização multiobjetivo pode ser definido por um vetor de funções \vec{f} que mapeia uma tupla de n parâmetros (variáveis de decisão) para uma tupla com k funções objetivos. Formalmente, esse problema pode ser definido, sem perda de generalidade, como:

$$\text{minimizar } \vec{f}(\vec{x}) := [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})], \quad (3.1)$$

sujeito à:

$$g_i(\vec{x}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (3.2)$$

$$h_j(\vec{x}) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, p, \quad (3.3)$$

onde $\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^n$ é o vetor de variáveis de decisão do espaço de busca, $f_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $i = 1, \dots, k$ são as funções objetivos e $g_i, h_j : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ são, respectivamente, as inequações e equações que modelam as restrições do problema.

Neste ponto, é importante definir o significado da palavra minimizar no contexto de um problema de otimização multiobjetivo. Para isso, algumas definições são necessárias.

Definição 1. Dado dois vetores $\vec{x}, \vec{y} \in \mathbb{R}^k$, define-se que $\vec{x} \leq \vec{y}$ se $x_i \leq y_i$ para $i = 1, \dots, k$, e que $\vec{x} \prec \vec{y}$ (lê-se \vec{x} domina \vec{y}) se $\vec{x} \leq \vec{y}$ e $\vec{x} \neq \vec{y}$.

Definição 2. Um vetor de variáveis de decisão no espaço de busca $\vec{x} \in \mathcal{X} \subset \mathbb{R}^n$ é não dominado em relação à \mathcal{X} , se não existe outro $\vec{x}' \in \mathcal{X}$ tal que $\vec{f}(\vec{x}') \prec \vec{f}(\vec{x})$.

Definição 3. Um vetor de variáveis de decisão no espaço de busca $\vec{x}^* \in \mathcal{F} \subset \mathbb{R}^n$ (\mathcal{F} é a região factível) é Pareto-ótimo se ele é não dominado em relação à \mathcal{F} .

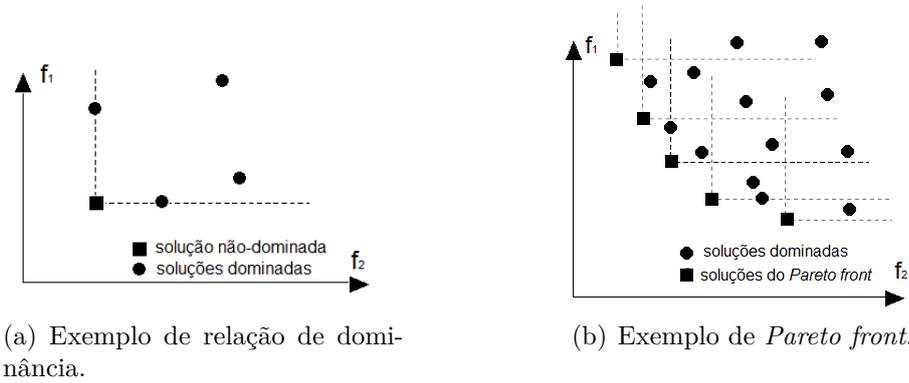


Figura 6: Exemplo de relação de dominância e de *Pareto front* em um processo de minimização em um espaço com dois objetivos, f_1 e f_2 .

Definição 4. O conjunto Pareto-ótimo \mathcal{P}^* é definido por:

$$\mathcal{P}^* = \{\vec{x} \in \mathcal{F} | \vec{x} \text{ é Pareto-ótimo}\}. \quad (3.4)$$

Definição 5. O *Pareto front* \mathcal{PF}^* é definido por:

$$\mathcal{PF}^* = \{\vec{f}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^k | \vec{x} \in \mathcal{P}^*\}. \quad (3.5)$$

A Figura 6(a) ilustra um caso particular de relação de dominância em um espaço de dois objetivos. A Figura 6(b) mostra um caso particular de um *Pareto front* em um espaço de dois objetivos. As soluções do *Pareto front* são chamadas de soluções incomparáveis.

Resolver um problema de otimização multiobjetivo consiste em determinar o conjunto Pareto-ótimo a partir do conjunto \mathcal{F} de todos os vetores de variáveis de decisão do espaço de busca que satisfaçam (3.2) e (3.3) simultaneamente.

3.2 Particle Swarm Optimization

O *Particle Swarm Optimization* (PSO) é um algoritmo estocástico para otimização de funções não-lineares de alta dimensionalidade e com variáveis contínuas. O PSO foi proposto por Kennedy e Eberhart em 1995 [23], e foi inspirado no comportamento social de organismos biológicos, mais especificamente, na habilidade de algumas espécies de animais de trabalhar em conjunto para localizar boas regiões com fontes de alimento, assim como ocorre em cardumes e em bandos de pássaros [24].

Apesar de ser uma técnica relativamente recente, o PSO vem sendo aplicado com sucesso na solução de diversos problemas da ciência e da engenharia devido à sua sim-

plicidade e eficácia. A simplicidade do PSO é explicado pelo fato dele ser uma técnica meta-heurística, o que significa que o PSO não é baseado em nenhum formalismo matemático, como acontece nas técnicas clássicas de otimização. O PSO usa o mesmo princípio que algumas espécies de aves utilizam para encontrar alimento em meio a uma área muito grande: a busca por cooperação. Assim, o PSO aplica os mecanismos de cooperação e comunicação das aves para resolver problemas complexos.

De forma simples, um problema de otimização consiste na busca da melhor solução de alguma função objetivo $f(\vec{x})$. A função objetivo representa uma quantidade a ser otimizada, isto é, uma quantidade a ser maximizada ou minimizada, e o vetor \vec{x} representa todas as variáveis independentes que afetam o valor da função objetivo. Os valores que a variável \vec{x} pode assumir são chamados de soluções candidatas, e o conjunto destas soluções é denominado de espaço de busca. Neste sentido, se \vec{a} é uma solução candidata, o valor $f(\vec{a})$ representa a qualidade desta solução. Desta forma, o objetivo de um método de otimização é encontrar a solução candidata que tem a melhor qualidade em relação as outras soluções do espaço de busca.

Para realizar a otimização da função objetivo $f(\vec{x})$, o PSO utiliza um enxame de partículas, em que cada partícula representa uma solução candidata. Essas partículas se movem em um espaço de busca de alta dimensionalidade procurando boas soluções usando uma combinação de atração para a melhor solução encontrada pela própria partícula e de uma atração para a melhor solução encontrada pela vizinhança da partícula. A vizinhança de uma partícula é definida como o conjunto de partículas com as quais ela é capaz de se comunicar [24].

No PSO, cada partícula i do enxame tem uma posição \vec{x}_i , que consiste de um vetor de d dimensões cujos componentes representam os parâmetros da função objetivo, uma velocidade \vec{v}_i e uma posição \vec{p}_i chamada de *pbest*, que representa a melhor posição encontrada pela partícula até o momento. No início do algoritmo, as partículas do enxame são inicializadas em posições aleatórias no espaço de busca segundo uma distribuição de probabilidade uniforme. Em seguida, estas partículas se movem pelo espaço de busca, a cada iteração t do algoritmo, segundo as equações:

$$\vec{v}_i(t+1) = \omega \vec{v}_i(t) + c_1 r_{1i}(t) [\vec{p}_i(t) - \vec{x}_i(t)] + c_2 r_{2i}(t) [\vec{p}_g(t) - \vec{x}_i(t)], \quad (3.6)$$

$$\vec{x}_i(t+1) = \vec{x}_i(t) + \vec{v}_i(t+1), \quad (3.7)$$

em que o termo $\vec{p}_g(t)$ é conhecido como *gbest* e representa a melhor posição encontrada até o momento pelas partículas vizinhas da partícula i no enxame. O termo w é a inércia da partícula, que representa a contribuição da velocidade anterior da partícula em sua velocidade atual, e c_1 e c_2 são constantes reais positivas conhecidas como coeficientes de aceleração. Os termos $r_{1i}(t)$ e $r_{2i}(t)$ são valores aleatórios retirados de uma distribuição de probabilidade uniforme no intervalo de $[0, 1]$.

O vetor velocidade é o responsável por guiar o processo de otimização, e para isso ele utiliza tanto o conhecimento adquirido individualmente pela partícula quanto o conhecimento adquirido pela partícula a partir da comunicação com o resto de enxame. O termo $c_1 r_{1i}(t) [\vec{p}_i(t) - \vec{x}_i(t)]$ da equação de atualização da velocidade é a componente cognitiva e representa a experiência da partícula. Essa componente é a responsável pela tendência que a partícula tem de voltar para a melhor solução encontrada por ela no passado. O termo $c_2 r_{2i}(t) [\vec{p}_g(t) - \vec{x}_i(t)]$, por sua vez, é conhecido como a componente social da equação da velocidade, e representa o conhecimento coletivo do enxame, sendo a responsável por atrair cada partícula para a melhor solução encontrada por alguma partícula de sua vizinhança. Um exemplo de movimento de uma partícula em um espaço de busca bidimensional está apresentado na Figura 7. Como se observa, o vetor velocidade consiste basicamente de uma soma vetorial das componentes cognitiva e social com a inércia da partícula.

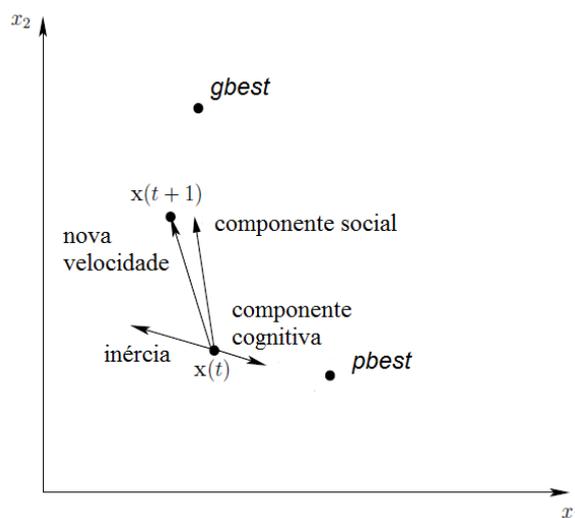


Figura 7: Exemplo de movimento de uma partícula em um espaço de busca com 2 dimensões no PSO.

Apesar de sua aceitação inicial, o PSO original apresentava alguns problemas de convergência e o algoritmo estagnava em mínimos locais. Esta situação levou ao surgimento

de diversas versões do PSO que buscavam melhorar muitos aspectos do algoritmo original. Em [24], defini-se um PSO padrão que reúne muitas dessas melhorias. O Algoritmo 1 apresenta o pseudocódigo de um algoritmo de PSO genérico.

Algoritmo 1: Pseudocódigo do algoritmo do PSO.

```
1 Inicialize as partículas no espaço de busca;
2 Avalie a qualidade de cada partícula do enxame;
3 Determine o gbest ;
4 enquanto critério de parada não for alcançado faça
5   para cada partícula faça
6     Atualize velocidade e posição;
7     Avalie a qualidade da partícula;
8     Atualize pbest;
9   Atualize o gbest;
10 Retorne o gbest;
```

3.3 Algoritmos de Otimização Multiobjetivo baseados em Enxame de Partículas

O PSO é um algoritmo para otimização de problemas que têm apenas um objetivo, isto é, problemas que envolvem a otimização de apenas uma função. Para aplicar o PSO na solução de problemas de otimização multiobjetivo, o algoritmo básico do PSO deve ser modificado. O grande problema na adaptação do PSO para problemas multiobjetivos está na questão da determinação do líder social (*gbest*) e do líder cognitivo (*pbest*) de cada partícula. No PSO, a escolha do líder é completamente determinada. No entanto, em uma função multiobjetivo existem muitas soluções não-dominadas e qualquer uma delas pode ser um possível líder. Sendo assim, muitas abordagens para a determinação dos líderes de cada partícula foram propostas na literatura. Algumas dessas abordagens são apresentadas nas próximas subseções.

3.3.1 Otimização Multiobjetiva por Enxame de Partículas

O algoritmo de Otimização Multiobjetiva por Enxame de Partículas (**MOPSO** - *Multi-Objective Particle Swarm Optimization*) foi proposto por Coello Coello *et. al* em [25]. Ele é baseado em um arquivo externo em que cada partícula deposita sua experiência após cada iteração. Mais precisamente, o arquivo externo é um repositório no qual as soluções não-dominadas encontradas pelas partículas durante o processo de busca são

armazenadas.

Nesta abordagem, o espaço de objetivos explorado é dividido em hipercubos¹ e cada solução do repositório é associada a um desses hipercubos. Em seguida, cada hipercubo recebe um valor de aptidão (*fitness*) que representa a sua qualidade. Esse valor depende da quantidade de soluções que estão dentro desse hipercubo. Quanto mais soluções um hipercubo tiver, menor será sua qualidade. E quanto menos soluções um hipercubo tiver, maior será sua qualidade. Para se determinar o líder de uma partícula, seleciona-se, primeiramente, um hipercubo usando o método de seleção por roleta [17], método segundo o qual a probabilidade de um hipercubo ser selecionado é proporcional ao seu *fitness*. E, em seguida, escolhe-se aleatoriamente uma das soluções que estão dentro do hipercubo selecionado.

O MOPSO usa um operador de mutação para manter a diversidade no processo de busca e, assim, fugir de *Pareto fronts* locais. A principal desvantagem deste algoritmo é que o número de hipercubos utilizados depende do problema, de modo que sua eficácia pode ser comprometida se este parâmetro não for ajustado adequadamente.

3.3.2 Otimização Multiobjetiva por Enxame de Partículas usando Estratégia por Busca Cruzada

O algoritmo de Otimização Multiobjetiva por Enxame de Partículas usando Estratégia por Busca Cruzada (**CSS-MOPSO** - *Cross-Searching Strategy for Multi-objective Particle Swarm Optimization*) foi proposto por Chiu *et. al* [26], e utiliza dois líderes sociais, $gbest_1$ e $gbest_2$, para guiar o processo de busca e nenhum líder cognitivo.

Para seleção do $gbest_1$ é necessário primeiro estabelecer o ponto *datum*, ponto que consiste da intersecção de retas perpendiculares entre si e que interceptam as soluções extremas do arquivo-externo (ver Figura 8(a)). Em seguida, é necessário estabelecer os vários ângulos θ entre um membro do arquivo e as partículas do enxame. O ângulo θ é o ângulo formado entre a reta que intercepta um membro do arquivo-externo e o ponto *datum*, e a reta que intercepta este mesmo membro do arquivo e a partícula do enxame. O membro do arquivo que formar o menor ângulo θ com uma das partículas do enxame será atribuído como o guia $gbest_1$ desta partícula (ver Figura 8(a)).

A seleção do $gbest_2$, por sua vez, é feita de acordo com o valor do *fitness* de um objetivo f_i escolhido randomicamente em cada iteração. As partículas são ordenadas pelo seu valor

¹O hipercubo é a generalização do quadrado e do cubo para n dimensões.

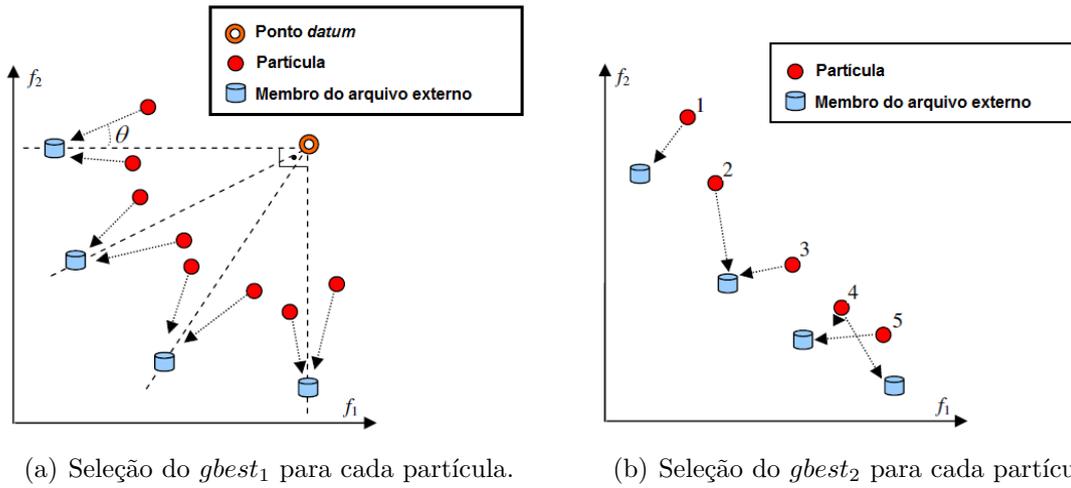


Figura 8: Seleção dos líderes das partículas no CSS-MOPSO em um espaço com 2 objetivos.

de *fitness* f_i no espaço de objetivos, e são numeradas em ordem crescente segundo f_i . Para uma partícula com índice par, o membro do arquivo externo mais próximo cujo valor de *fitness* f_i é maior que o da partícula será atribuído como líder $gbest_2$ desta partícula. Já para um partícula com índice ímpar, o membro do arquivo externo mais próximo cujo valor de *fitness* f_i é menor que o da partícula será atribuído como líder $gbest_2$ desta partícula. A Figura 8(b) ilustra a seleção do $gbest_2$ para cada partícula em um espaço de objetivos com 2 dimensões. Nesse caso, as partículas estão ordenadas segundo o objetivo f_1 .

O CSS-MOPSO, assim como o MOPSO, tem um operador para gerar diversidade durante o processo de busca. Este operador provoca uma perturbação Gaussiana no vetor velocidade de m partículas escolhidas aleatoriamente do enxame. Ele também tem um operador para eliminar soluções não-dominadas do arquivo-externo para permitir uma distribuição mais uniforme entre os membros do *Pareto-front*.

3.3.3 Otimização Multiobjetiva por Enxame de Partículas utilizando Análise de Densidade e Seleção por Roleta

O algoritmo de Otimização Multiobjetiva por Enxame de Partículas utilizando Análise de Densidade e Seleção por Roleta (**MOPSO-CDR** - *Multiple Objective Particle Swarm Optimization Approach using Crowding Distance and Roulette Wheel*) foi proposto por Santana *et. al* [19]. Neste algoritmo, os candidatos para líderes sociais e cognitivos estão no arquivo externo. O arquivo externo é um repositório cujo objetivo é armazenar soluções não-dominadas encontradas pelo enxame ao longo do processo de busca. A cada

iteração, o algoritmo tem que decidir se certa solução encontrada por uma das partículas do enxame deve ser adicionada ou não no arquivo externo. No início do algoritmo, o arquivo externo está vazio e as soluções não-dominadas representadas pelas partículas do enxame são adicionadas nele. Em seguida, após cada iteração, as novas soluções candidatas encontradas pelo enxame são comparadas com as soluções presentes no arquivo externo. Se uma solução candidata for não-dominada por uma das soluções do arquivo externo, ela é adicionada no arquivo externo. Caso contrário, esta solução candidata é desprezada. Pode ocorrer também de uma solução candidata dominar soluções do arquivo externo. Nesse caso, as soluções dominadas são removidas do arquivo externo, e a solução candidata é adicionada no arquivo.

No MOPSO-CDR, cada membro do arquivo externo tem um *fitness* (qualidade) que é igual ao seu *crowding distance* [27]. O *crowding distance* de uma solução do arquivo externo corresponde ao semi-perímetro do retângulo que conecta as soluções vizinhas desta solução. De modo que quanto maior for o *crowding distance* de uma solução, maior é a probabilidade desta solução ser escolhida como líder social por alguma partícula do enxame. Desta forma, as partículas são atraídas para regiões menos densas do arquivo externo.

A escolha do líder cognitivo (*pbest*) também é baseado no *crowding distance*. O líder cognitivo de cada partícula é modificado se a nova posição da partícula dominar o seu *pbest* atual. Se esta nova posição e o *pbest* são incomparáveis, a escolha é feita usando o arquivo externo. O algoritmo busca no arquivo externo por soluções com a menor distância euclidiana para o *pbest* e para a nova posição da partícula. Se a solução mais próxima à nova posição da partícula tem um *crowding distance* maior que a solução mais próxima do *pbest* atual, então esta solução se torna o novo *pbest* da partícula.

O arquivo externo tem um número máximo de soluções. Se esse número é excedido após o final de cada iteração, soluções com menor *crowding distance* são eliminadas. Desta forma, soluções em regiões mais populosas são removidas do arquivo externo. Essa característica permite ao MOPSO-CDR produzir um *Pareto front* uniformemente distribuído. Desse modo, o *Pareto front* apresenta um aspecto aproximadamente contínuo, permitindo, assim, uma maior diversidade de soluções.

Esta abordagem também utiliza o operador de turbulência presente no MOPSO para aumentar a diversidade no processo de busca. No início do algoritmo, todas as partículas do enxame são afetadas pelo operador de turbulência, e, nas iterações seguintes, a influência deste operador se torna cada vez menor. O pseudo-código do MOPSO-CDR é

apresentado no Algoritmo 2.

Algoritmo 2: Pseudocódigo do MOPSO-CDR.

```

1 Inicialize o enxame;
2 Determine os líderes iniciais do arquivo externo;
3 Qualifique os líderes por crowding distance;
4 enquanto critério de parada não é atingido faça
5   para cada partícula faça
6     Aplicar o operador de turbulência utilizado no MOPSO;
7     Selecione líder usando crowding distance e seleção por roleta;
8     Atualize velocidade e posição;
9     Avalie a qualidade da partícula;
10    Atualize pbest usando torneio binário;
11  Atualize líderes do arquivo externo;
12  Qualifique os líderes por crowding distance;
13 Retorne o arquivo externo;
```

3.4 Métricas para Avaliar Algoritmos de Otimização Multiobjetivo

Existem na literatura algumas métricas que podem ser usadas para medir a qualidade do *Pareto front* encontrado por um algoritmo multiobjetivo. As métricas usadas neste trabalho foram: *Spacing* [19], *Maximum spread* [19] e *Coverage* [18] [28]. Cada métrica está relacionada com alguma característica do *Pareto front*.

- ***Spacing* (S):** Esta métrica tem como objetivo medir a separação entre as soluções não-dominadas por todo o *Pareto front*. A separação entre uma solução do *Pareto front* e suas soluções vizinhas é calculado segundo a equação (3.8).

$$d_i = \min_j (|f_1^i(\vec{x}) - f_1^j(\vec{x})| + |f_2^i(\vec{x}) - f_2^j(\vec{x})|), \quad (3.8)$$

onde d_i é a distância de Manhattan entre as soluções vizinhas da solução i do *Pareto front* em um espaço de dois objetivos. Nesta equação $i, j = 1, \dots, n$, e n é o número de soluções não-dominadas do *Pareto front*.

O *Spacing* representa a variância destas distâncias d_i , e é calculado segundo a equação (3.9).

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{d} - d_i)^2}, \quad (3.9)$$

em que \bar{d} é a média das distâncias d_i de todas as n soluções do *Pareto front*.

Como toda medida de variância, quanto menor for o valor do *Spacing*, melhor será a distribuição das distâncias d_i . Conseqüentemente, as soluções do *Pareto front* estarão separadas mais uniformemente. Um *Spacing* igual a zero significa que todas as soluções estão equidistantes no *Pareto front*.

- **Maximum Spread (MS):** Esta métrica corresponde à distância Euclidiana entre as duas soluções mais afastadas do *Pareto front*, e é calculada segundo a equação (3.10).

$$MS = \sqrt{\sum_{m=1}^M (\max_{i=1}^n f_m^i - \min_{i=1}^n f_m^i)^2}, \quad (3.10)$$

onde n é o número de soluções no *Pareto front* e M é o número de objetivos em um determinado problema.

Quando maior o *Maximum Spread* do *Pareto front* maior é a sua qualidade, pois significa que existe uma maior diversidade de soluções não-dominadas.

- **Coverage (C):** Para se comparar dois *Pareto fronts* utiliza-se uma métrica conhecida como *Coverage*. Para dois conjuntos *Pareto front* A e B , o *Coverage* $C(A, B)$ de A em relação a B é calculado usando a seguinte equação:

$$C(A, B) = \frac{|\{b \in B; \exists a \in A : a \succeq b\}|}{|B|}, \quad (3.11)$$

em que $|B|$ representa a quantidade de soluções no *Pareto front* B .

Como se pode observar, o valor de $C(A, B)$ está dentro do intervalo $[0, 1]$. O valor $C(A, B) = 1$ significa que todas as soluções em B são fracamente dominadas por A . Por outro lado, $C(A, B) = 0$ significa que nenhuma das soluções em B são fracamente dominadas por A . Caso $0 < C(A, B) < 1$ e $0 < C(B, A) < 1$, então nem A domina fracamente B nem B domina fracamente A , e, nesta situação, pode-se dizer que A não é pior que B de modo que os conjuntos A e B são incomparáveis. Por último, é importante observar que $C(A, B)$ não é necessariamente igual a $1 - C(B, A)$.

4 Experimentos

“ *Misura ciò che è misurabile, e rendi
misurabile ciò che non lo è.*”

– Galileo Galilei

4.1 Arranjo Experimental

Um bom projeto de amplificador Raman deve fornecer ganho máximo em todos os canais ao mesmo tempo em que se busca minimizar o *ripple*. Entretanto, a complexa relação não-linear da amplificação Raman entre sinais e bombeios faz com que esses dois objetivos tenham uma natureza conflitante, pois à medida em que se obtém alto ganho nos canais, a diferença de ganho entre os canais é acentuada e, conseqüentemente, o *ripple* é comprometido. Neste sentido, o projeto de amplificadores Raman pode ser caracterizado como um problema de otimização multiobjetivo.

Os experimentos realizados neste trabalho foram conduzidos de modo a demonstrar pela primeira vez a viabilidade da aplicação de um algoritmo de otimização multiobjetivo no projeto de amplificadores Raman banda larga. Para isso, utilizou-se o algoritmo MOPSO-CDR, devido ao seu bom desempenho em relação à outras abordagens [19].

Para utilizar o MOPSO-CDR na otimização dos amplificadores, foi necessário definir os parâmetros de entrada do algoritmo (variáveis de decisão) e os objetivos do problema. Os parâmetros de entrada foram definidos como os comprimentos de onda e os níveis de potência dos bombeios. Já os objetivos otimizados foram o ganho médio *on-off* e o *ripple* do ganho do amplificador. Para o cálculo do ganho médio *on-off* e do *ripple*, foi utilizado o Simulador Analítico, ferramenta computacional baseada em um modelo analítico para a evolução da potência de sinais e bombeios ao longo da fibra óptica. Esse simulador é descrito na Seção 4.2. Essa ferramenta recebe a alocação de bombeios (comprimentos de onda e níveis de potência) como entrada e retorna o ganho médio *on-off*

e o *ripple* correspondente a essa alocação. Neste sentido, o Simulador Analítico funciona como função objetivo para o MOPSO-CDR. Deste modo, para avaliar uma partícula, o MOPSO-CDR envia o vetor de variáveis de decisão dessa partícula, contendo a alocação de bombesios, para o Simulador Analítico que, por sua vez, retorna o vetor de objetivos contendo o ganho médio *on-off* e o *ripple* que representa a qualidade da partícula avaliada. A Figura 9 ilustra a comunicação entre o MOPSO-CDR e o Simulador Analítico.

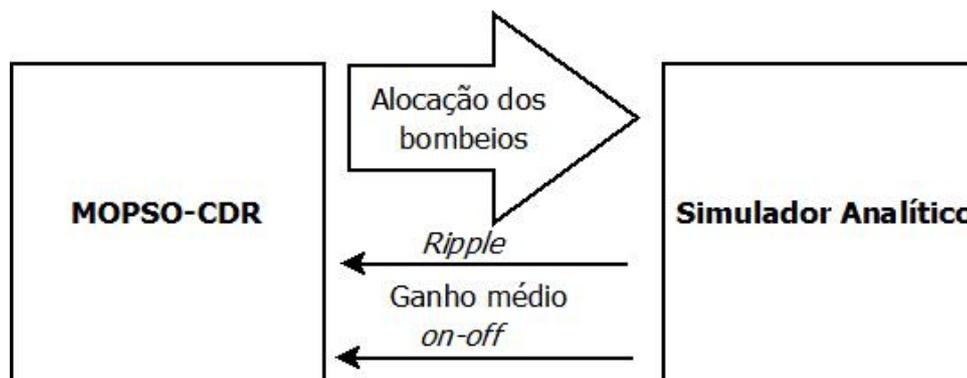


Figura 9: Comunicação entre o MOPSO-CDR e o Simulador Analítico.

Após a implementação da comunicação do MOPSO-CDR com o Simulador Analítico, realizou-se experimentos de otimização em amplificadores Raman com 3, 4 e 5 *lasers* de bombeamento. Todos os amplificadores eram amplificadores distribuídos na configuração contra-propagante em uma fibra óptica monomodo de 75 km de comprimento. Em todos os amplificadores, a soma das potências dos *lasers* de bombeamento é igual a 1,2 W. Essa característica é importante pois permite que os desempenhos dos amplificadores possam ser comparados. Outros aspectos do arranjo experimental são detalhados a seguir.

Objetivos.

Foram escolhido dois objetivos: o *ripple* e o ganho médio *on-off*. Nas simulações com o MOPSO-CDR, o *ripple* foi minimizado, enquanto que o ganho médio *on-off* foi maximizado. O ganho *on-off* representa o quanto de ganho o amplificador adiciona ao sinal em relação a uma situação sem amplificação. Sendo assim, o ganho médio *on-off* é simplesmente a média aritmética dos ganhos *on-off* de cada sinal. O *ripple*, por sua vez, corresponde à variação do ganho entre os sinais amplificados. Ou seja, o *ripple* é a diferença entre o ganho máximo e o ganho mínimo para a faixa de sinais analisada.

Definição dos Parâmetros do MOPSO-CDR.

Nas simulações com o MOPSO-CDR, foram utilizados 20 partículas, uma taxa de

mutação igual 0,5 e um número máximo de soluções no arquivo externo igual 200. Os coeficientes c_1 e c_2 tinham o valor 1,49445 e o ω diminuía linearmente de 0,4 até 0. O número máximo de iterações é igual 1000. Esses valores foram definidos a partir de experimentos com funções de teste, como mostrado em [19].

Representação da Partícula.

A representação das partículas no MOPSO-CDR consiste em um vetor contendo os comprimentos de onda e os níveis de potência dos *lasers* de bombeamento do amplificador Raman, como mostra a Tabela 1. Para um amplificador com n *lasers* de bombeamento, os n primeiros elementos do vetor correspondem aos comprimentos de onda dos *lasers*, enquanto que os elementos restantes correspondem aos seus níveis potência. A Tabela 1 representa uma partícula para o caso particular em que um amplificador Raman com 3 *lasers* de bombeamento é otimizado. Conforme mostra a Tabela 1, o primeiro *laser* de bombeamento tem comprimento de onda λ_1 e potência igual P_1 , o segundo *laser* de bombeamento tem comprimento de onda λ_2 e potência igual P_2 , e o mesmo ocorre para o terceiro *laser*. É importante ressaltar que os comprimentos de onda dos *lasers* de bombeamento devem estar em ordem crescente de alocação, pois isso era uma exigência do Simulador Analítico. Os comprimentos de onda dos *lasers* de bombeamento podiam variar livremente dentro do intervalo de 1410 nm a 1470 nm, enquanto que as potências podiam variar entre 100 mW e 1200 mW/ n . Para o caso em que se tinha 3 *lasers* de bombeamento, por exemplo, as potências podiam variar entre 100 mW e 400 mW.

Tabela 1: Representação da partícula utilizada na otimização de um amplificador Raman com 3 *lasers* de bombeamento.

λ_1	λ_2	λ_3	P_1	P_2	P_3
1442,175 nm	1443,270 nm	1451,445 nm	400 mW	396 mW	400 mW

4.2 O Simulador Analítico

O Simulador Analítico é uma ferramenta computacional para análise de sistemas de comunicações ópticas multicanais com amplificadores Raman com múltiplos bombeios. O simulador é baseado em um modelo analítico aproximado da evolução de bombeios e sinais ao longo do enlace óptico proposto por Cani [21]. O objetivo deste simulador é calcular o ganho alcançado pelos canais devido a presença de um amplificador Raman

distribuído em uma fibra óptica monomodo com bombeios contra-propagantes.

Os parâmetros de entrada do simulador são:

- Comprimento do enlace óptico. Este parâmetro representa o comprimento efetivo do enlace óptico, ou seja, o comprimento no qual ocorre o processo de amplificação. Para a realização dos experimentos, este parâmetro foi definido em 75 km;
- O número de bombeios com o respectivos comprimentos de onda e potência;
- O número de canais com o respectivos comprimentos de onda. Nos experimentos, foram utilizados 20 canais WDM na banda C entre 1545,32 nm e 1560,61 nm com 100 GHz de separação entre os canais;
- Fator de Polarização do *laser* de bombeamento. O ganho fornecido pela amplificação Raman depende da polarização da luz do sinal em relação à luz do bombeio. Para enlaces com longos comprimentos empregados em sistemas de transmissão, a polarização entre bombeios e sinais varia arbitrariamente entre polarização paralela e perpendicular. Esta variação da polarização é computada pelo Simulador Analítico por meio de um fator de polarização, cujo valor é assumido igual a 1 se a polarização entre bombeios e sinais for mantida, ou 2 caso a polarização entre sinais e bombeios varie à medida em que eles se propagam pela fibra óptica [21]. Nos experimentos, foi assumido um fator de polarização igual a 2.

As saídas fornecidas pelo simulador são:

- O ganho médio, que é a média aritmética dos ganhos dos canais analisados. O ganho, por sua vez, é a relação entre a potência do sinal no final da fibra óptica em relação a sua potência no início da fibra.
- O ganho médio *on-off*, que é a média aritmética do ganho *on-off* de todos os canais analisados. O ganho *on-off* de um canal é relação entre a potência do canal no final do enlace na situação com amplificação e sem amplificação;
- O *ripple*, que é a diferença entre o ganho máximo e o ganho mínimo para a faixa de canais analisada.

5 Resultados

“ *Dietro ogni problema c'è un'opportunità.*”

– Galileo Galilei

Neste capítulo, serão apresentados os resultados dos experimentos realizados segundo o arranjo experimental apresentado no Capítulo 4. O resto deste capítulo está organizado como segue. Na Seção 5.1, são apresentados os resultados para o amplificador Raman com 3 *lasers* de bombeamento. A Seção 5.2 apresenta os resultados para 4 *lasers* de bombeamento. A Seção 5.3 apresenta os resultados para o caso em que o amplificador Raman tem 5 *lasers* de bombeamento. Por fim, a Seção 5.4 apresenta a discussão dos resultados para todos os experimentos realizados.

5.1 Resultados para 3 *lasers* de bombeamento

Inicialmente, foi realizada a otimização do amplificador Raman com 3 *lasers* de bombeamento por meio do MOPSO-CDR. Para verificar o processo de convergência do algoritmo, foram coletados os *Pareto fronts* nas iterações 50, 100, 500, 1000. A Figura 10 ilustra a evolução dos *Pareto fronts* ao longo dessas iterações, e mostra visualmente a convergência do algoritmo. A partir dos *Pareto fronts* coletados, foram calculadas as métricas apresentadas na Seção 3.4. Os resultados dessas métricas estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2: Métricas dos *Pareto fronts* para o amplificador Raman com 3 *lasers* de bombeamento.

Iteração	<i>Spacing</i>	<i>Maximum Spread</i>	<i>Coverage</i>
50	0,436566	5,594254	1
100	0,285139	5,705005	0,7
500	0,056104	6,003214	0,875
1000	0,051973	6,190227	0,510204

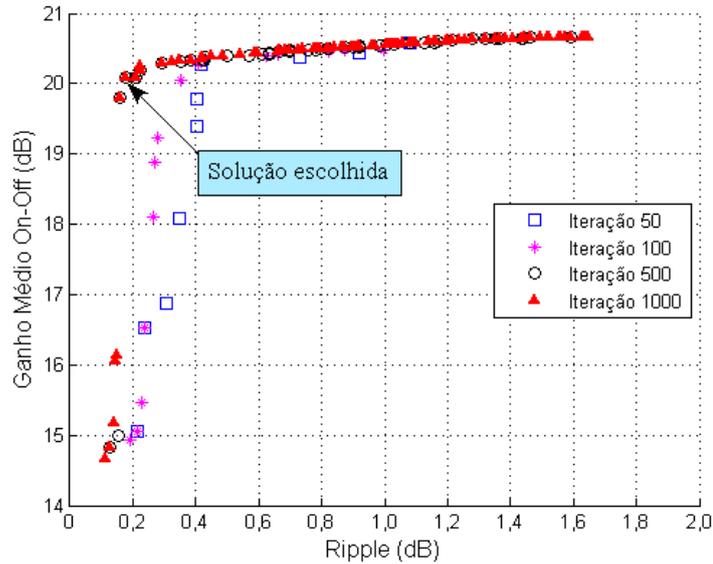


Figura 10: Evolução dos *Pareto fronts* para o amplificador Raman com 3 *lasers* de bombeamento.

O *Coverage* de cada *Pareto front* foi calculado em relação ao último *Pareto front* anteriormente coletado. Por exemplo, o *Coverage* do *Pareto front* na iteração 100 foi calculado em relação ao *Pareto front* na iteração 50, e o *Pareto front* na iteração 500 foi calculado em relação ao *Pareto front* na iteração 100. Como se pode observar pela Tabela 2, o *Coverage* do *Pareto front* na iteração 1000 foi de aproximadamente 0,51. Desta forma, 49 % das soluções do *Pareto front* na iteração 500 fazem parte do *Pareto front* na iteração 1000. Esse *Coverage* relativamente baixo é um indicativo da convergência do algoritmo, que também é sustentada pela comparação qualitativa entre o *Pareto front* na iteração 1000 e *Pareto front* na iteração 500. Pela Figura 10, observa-se que esses *Pareto fronts* estão praticamente sobrepostos, de modo que não existe uma mudança significativa na qualidade de suas soluções.

Pela Tabela 2, observa-se também que o *Spacing* está diminuindo ao longo das iterações, de modo que o *Spacing* do *Pareto front* na iteração 1000 foi de aproximadamente 0,051973. Esse baixo valor no *Spacing* justifica a uniformidade na distribuição das soluções nesse *Pareto front*, característica que possibilita uma maior diversidade de soluções para o projeto do amplificador.

É importante destacar que todas as 86 soluções do *Pareto front* na iteração 1000 apresentam ganho médio *on-off* acima de 14 dB. Além disso, 92 % das soluções apresentam ganho médio *on-off* superior a 20 dB. Desta forma, grande parte das soluções está em uma

região de alto ganho médio *on-off* compreendida entre 20 dB e 21 dB. Todas as soluções apresentaram *ripple* inferior a 1,7 dB, e 53 % das soluções apresentaram *ripple* abaixo de 1 dB. O MOPSO-CDR também conseguiu encontrar soluções com ganho médio *on-off* em torno de 20 dB e com *ripple* inferior a 0,2 dB. Este é o caso da solução indicada pela seta, que representa um solução com ganho médio *on-off* de aproximadamente 20,08 dB e um *ripple* de aproximadamente 0,178 dB. Desse modo, essa solução representa uma boa opção para o projeto de um amplificador Raman com 3 *lasers* de bombeamento. Os comprimentos de onda e as potências dos *lasers* de bombeamento relacionados com essa solução são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Comprimentos de onda e potências dos 3 *lasers* de bombeamento associados com a solução escolhida.

λ (nm)	P (W)
1444,423	0,391
1447,189	0,4
1454,672	0,4

Para demonstrar o comportamento de um amplificador Raman construído segundo as especificações da Tabela 3, foi realizada a simulação desse amplificador para um sistema óptico com 20 canais utilizando o Simulador Analítico. A Figura 11 apresenta o ganho calculado pelo Simulador Analítico para cada canal. Como se pode observar o *ripple* da curva foi menor que 0,2 dB, o que significa que todos os canais praticamente tiveram o mesmo ganho. Já a Figura 12 apresenta o ganho *on-off* para os canais analisados. A partir dessa figura, pode-se perceber que todos os canais tiveram um ganho *on-off* superior a 20 dB. Aqui fica evidente que, apesar de ter sido otimizado o ganho médio *on-off*, não houve um descompasso nos ganhos dos sinais, pois o *ripple* obtido foi menor que 0,2 dB.

Desta forma, o amplificador Raman projetado conforme os valores de comprimento de onda e de potência da Tabela 3 é capaz de fornecer alto valores ganhos em todos os canais ao mesmo tempo em que diminui a diferença de ganho entre os sinais amplificados. Entretanto, esta não é a única solução possível, pois, dependendo das necessidades do projetista, outras soluções de projeto podem ser utilizadas.

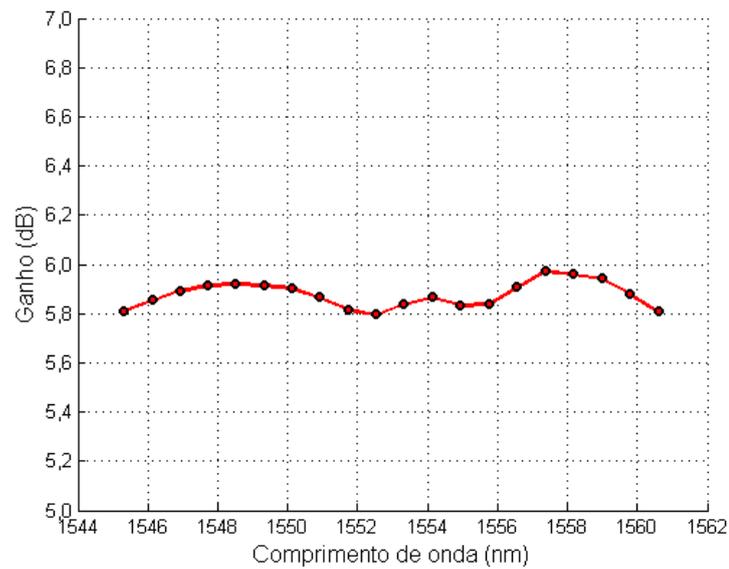


Figura 11: Ganho dos canais determinado pelo Simulador Analítico para o amplificador Raman com 3 *lasers* de bombeamento.

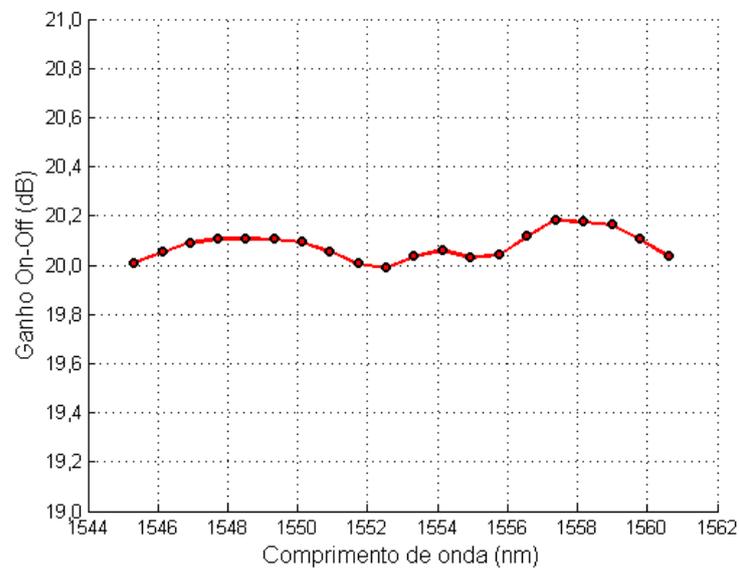


Figura 12: Ganho on-off dos canais determinado pelo Simulador Analítico para o amplificador Raman com 3 *lasers* de bombeamento.

5.2 Resultados para 4 *lasers* de bombeamento

O MOPSO-CDR obteve um bom desempenho no projeto de um amplificador Raman com 3 *lasers* de bombeamento. Com isso, pensou-se em aplicá-lo no projeto de amplificadores com 4 *lasers* de bombeamento. A evolução dos *Pareto fronts* é apresentada na Figura 13. Assim como no experimento anterior, foram calculadas as métricas dos *Pareto fronts*. Os dados obtidos a partir das métricas estão resumidos na Tabela 4.

Assim como no experimento anterior, o *Coverage* do *Pareto front* na iteração 1000 foi relativamente baixo, ficando em torno de 0,57. Esse fato indica a convergência do algoritmo, que também é sugerida pela proximidade entre o *Pareto front* na iteração 1000 e o *Pareto front* na iteração 500. Outro fato importante a respeito do *Pareto front* da iteração 1000 é que todas as suas soluções estão no intervalo de ganho médio *on-off* de 18 dB a 21 dB, ou seja, todas as soluções estão em uma região de alto ganho. Além disso, todas as soluções apresentam um *ripple* inferior a 1,6 dB. Esta concentração de soluções nesta região é o que explica o baixo valor do *Maximum Spread*, que ficou em torno de 2,583995. É importante destacar também que o *Pareto front* do ciclo 1000 apresentou soluções com *ripple* muito próximo de zero e com valores de ganho médio *on-off* em torno de 18,5 dB. Ou seja, soluções que representam amplificadores Raman capazes de fornecer alto ganho na banda de sinais analisada ao mesmo tempo em que equaliza os sinais amplificados.

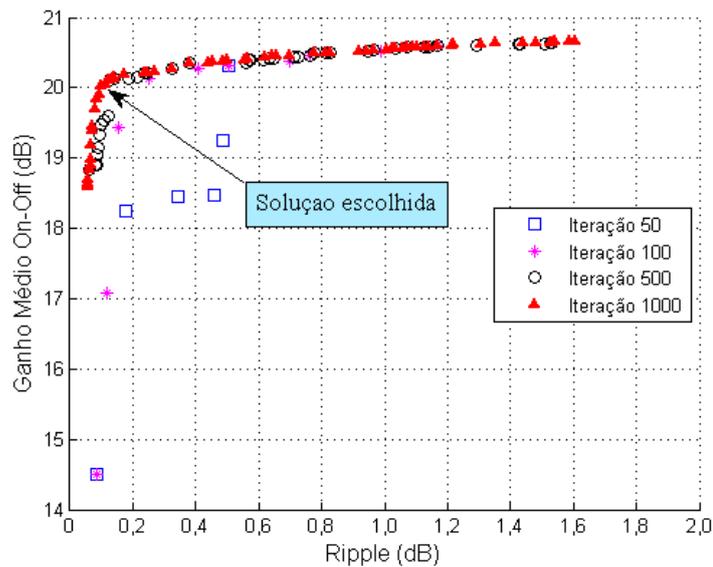


Figura 13: Evolução dos Pareto fronts para o amplificador Raman com 4 *lasers* de bombeamento.

Tabela 4: Métricas dos *Pareto fronts* para o amplificador Raman com 4 *lasers* de bombeamento.

Iteração	<i>Spacing</i>	<i>Maximum Spread</i>	<i>Coverage</i>
50	1,411556	5,830417	1
100	0,957998	6,200851	0,666667
500	0,037557	2,329000	0,8
1000	0,031364	2,583995	0,571429

O *Spacing*, assim como no experimento anterior, está diminuindo ao longo das iterações. Esse fato indica que o algoritmo está realizando menos busca em largura [17], e cada vez mais busca em profundidade [17]. Pela Figura 13, observa-se que o algoritmo convergiu na iteração 500, e, após essa iteração, o algoritmo possui a realizar busca em profundidade. Com isso, o *Pareto front* na iteração 1000 preencheu algumas lacunas existentes no *Pareto front* na iteração 500, fazendo com que o seu *Spacing* fosse menor que o *Spacing* do *Pareto front* na iteração 500. Desse modo, o *Pareto front* na iteração 1000 apresenta uma maior diversidade de soluções que o *Pareto front* na iteração 500.

A solução indicada pela seta na Figura 13 foi escolhida para o projeto do amplificador Raman com 4 *lasers* de bombeamento. Essa solução apresenta um ganho médio *on-off* de aproximadamente 20,04 dB e um *ripple* de aproximadamente 0,097 dB. Os valores de comprimento de onda e potência dos *lasers* de bombeamento do amplificador Raman associado a essa solução são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Comprimentos de onda e potências dos 4 *lasers* de bombeamento associados com a solução escolhida.

λ (nm)	P (W)
1442,944	0,298
1446,417	0,3
1447,915	0,3
1455,681	0,295

Assim como no experimento anterior, foi produzido o gráfico com o ganho alcançado por cada canal amplificado, como ilustra a Figura 14. O ganho *on-off* de cada canal também foi determinado como ilustra a Figura 15. Como se pode notar pela Figura 15, todos os canais apresentaram ganho *on-off* acima de 20 dB. Além disso, o *ripple* menor que 0,1 dB possibilitou equalizar praticamente todos canais. Essa equalização é mais evidente nos canais entre 1550 nm e 1554 nm.

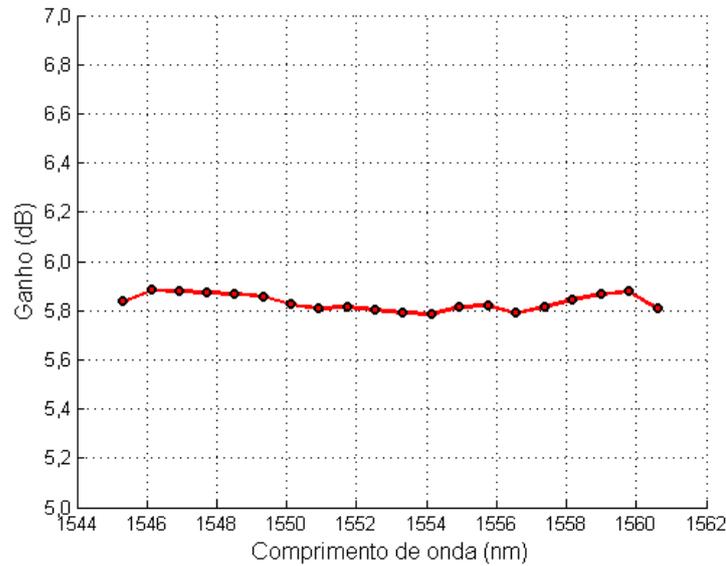


Figura 14: Ganho dos canais determinado pelo Simulador Analítico para o amplificador Raman com 4 *lasers* de bombeamento.

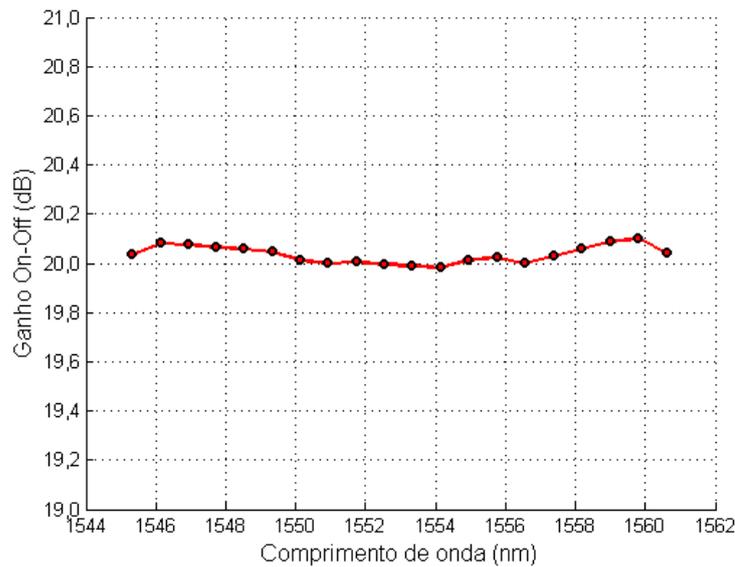


Figura 15: Ganho *on-off* dos canais determinado pelo Simulador Analítico para o amplificador Raman com 4 *lasers* de bombeamento.

5.3 Resultados para 5 *lasers* de bombeamento

Por fim, foi realizada a otimização de um amplificador Raman com 5 *lasers* de bombeamento. A evolução dos *Pareto fronts* é ilustrada na Figura 16. Analisando o processo de evolução, percebe-se que existem poucas soluções nos *Pareto fronts* em relação aos outros

experimentos. Este fato sugere que à medida que o número de *lasers* de bombeamento aumenta, o MOPSO-CDR apresenta dificuldades de encontrar soluções não-dominadas para o problema. Entretanto, o número de soluções no *Pareto front* ainda permaneceu satisfatório, e as soluções encontradas também apresentam alto valores de ganho médio *on-off* e baixo valores de *ripple*, do mesmo modo como ocorreu nos experimentos anteriores.

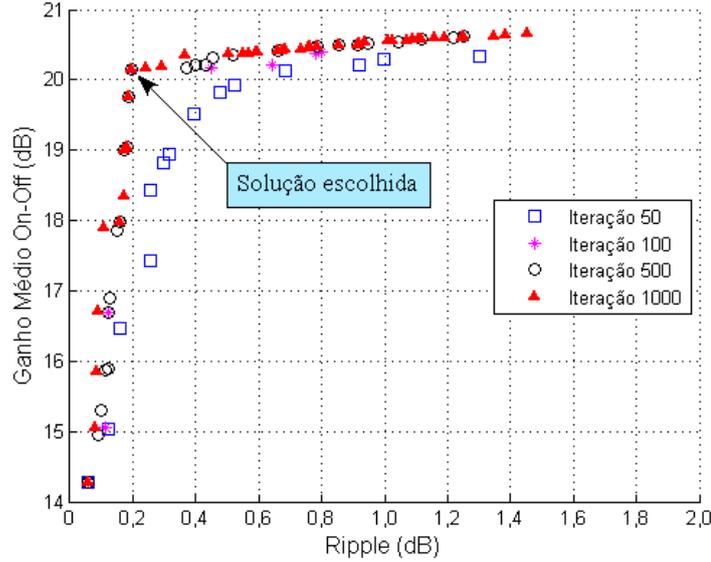


Figura 16: Evolução dos Pareto fronts para o amplificador Raman com 5 *lasers* de bombeamento.

Tabela 6: Métricas dos *Pareto fronts* para o amplificador Raman com 5 *lasers* de bombeamento.

Iteração	<i>Spacing</i>	<i>Maximum Spread</i>	<i>Coverage</i>
50	0,341724	6,174869	1
100	0,553079	6,167969	0,928571
500	0,153933	6,457115	0,625000
1000	0,234438	6,522859	0,555556

Como se pode observar pela Tabela 6, o *Coverage* está diminuindo ao longo das iterações. E o *Coverage* do *Pareto front* na iteração 1000 ficou em torno de 0,55. Desse modo, o *Coverage* relativamente baixo desse *Pareto front* e a comparação qualitativa entre esse *Pareto front* e o *Pareto front* na iteração 500 indicam a convergência do algoritmo.

Pela Figura 16, observa-se que o *Pareto front* na iteração 1000 apresenta poucas soluções em relação aos *Pareto fronts* produzidos pelos experimentos anteriores. Além

disso, pode-se verificar que essas soluções estão muito separadas uma das outras, fato que justifica o alto valor do *Spacing* desse *Pareto front* que foi de 0,234438.

Escolheu-se a solução indicada pela seta na Figura 16 para projetar o amplificador Raman com 5 *lasers* de bombeamento. Essa solução corresponde a um ganho médio *on-off* em torno de 20,16 dB e um *ripple* em torno de 0,193 dB. A Tabela 7 apresenta os valores de comprimento de onda e de potência dos *lasers* de bombeamento utilizados no amplificador Raman. O gráfico que relaciona o ganho calculado pelo Simulador Analítico em função do comprimento de onda do canal amplificado é ilustrado na Figura 17. E o gráfico que relaciona o ganho *on-off* em função do comprimento de onda do canal é apresentado na Figura 18. Como se pode observar o amplificador Raman forneceu alto ganho aos canais sem comprometer o *ripple*.

Tabela 7: Comprimentos de onda e potências dos 5 *lasers* de bombeamento associados com a solução escolhida.

λ (nm)	P (W)
1443,79	0,24
1446,984	0,24
1449,223	0,239
1450,55	0,24
1459,116	0,24

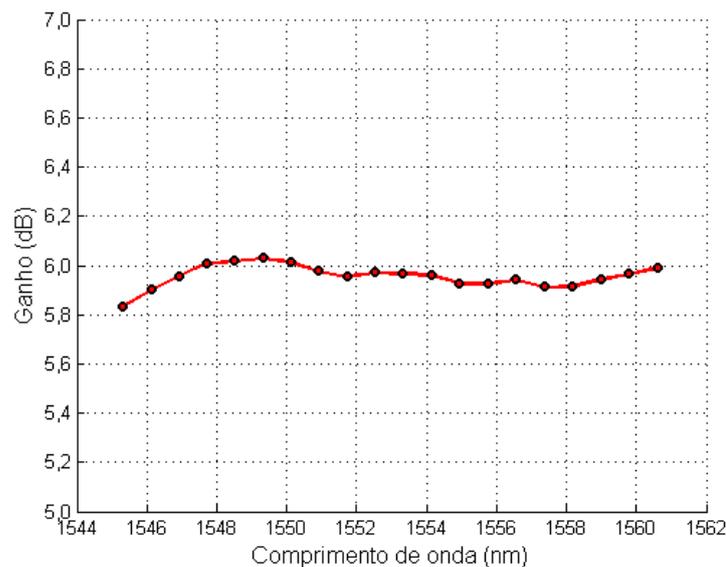


Figura 17: Ganho dos canais determinado pelo Simulador Analítico para 5 *lasers* de bombeamento.

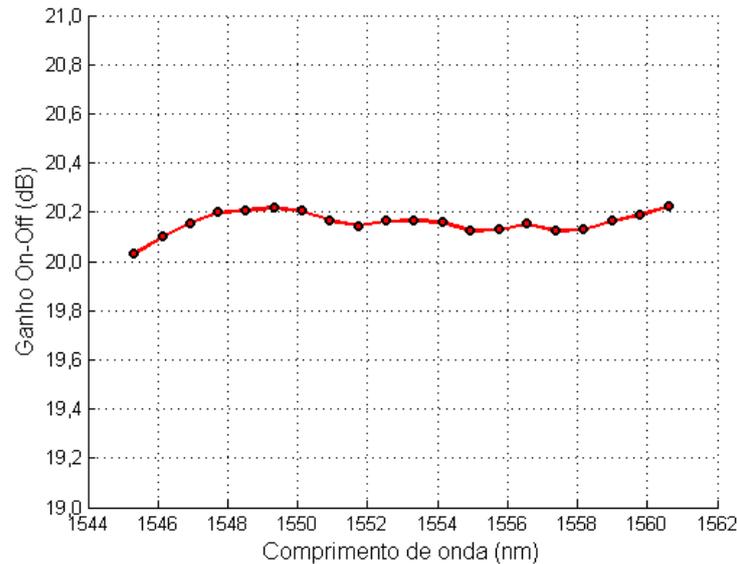


Figura 18: Ganho *on-off* dos canais determinado pelo Simulador Analítico para 5 *lasers* de bombeamento.

5.4 Discussão dos resultados

A Figura 19 apresenta os *Pareto fronts* produzidos pelo algoritmo nos 3 experimentos de otimização. Como se pode observar pela figura, foi possível obter, por meio do algoritmo, amplificadores com ganho médio *on-off* entre 20 e 21 dB com *ripple* inferior a 1 dB. É importante destacar a grande quantidade de soluções nessa região de alto ganho e baixo *ripple*. Mais precisamente, a ferramenta foi capaz de produzir soluções com ganho médio *on-off* entre 20 e 20,5 dB com *ripple* inferior a 0,5 dB, como mostra a Figura 20. Essa figura é uma parte da Figura 19. Como se pode observar por essa figura, os *Pareto fronts* para 3 e 5 *lasers* de bombeamento conseguiram obter uma única solução com ganho médio *on-off* entre 20 e 20,5 dB e com *ripple* menor que 0,2 dB. Entretanto, o *Pareto front* para 4 *lasers* de bombeamento conseguiu produzir 8 soluções segundo essas características. Além disso, esse *Pareto front* é o único que contém uma solução com ganho médio *on-off* entre 20 e 20,5 dB e com *ripple* menor que 0,1 dB.

Como se pode observar pela Figura 20, o *Pareto front* para 5 *lasers* de bombeamento apresentou uma qualidade inferior em relação aos outros *Pareto fronts*, obtendo poucas soluções e um alto valor de *Spacing*. Esse fato se deve à:

- necessidade de um maior número de iterações para a convergência do MOPSO-CDR, pois existem mais parâmetros para otimizar;

- maior interação não-linear entre sinais e bombeios, aumentado, desse modo, a complexidade do problema;
- maior restrição de potência em cada *laser* de bombeamento.

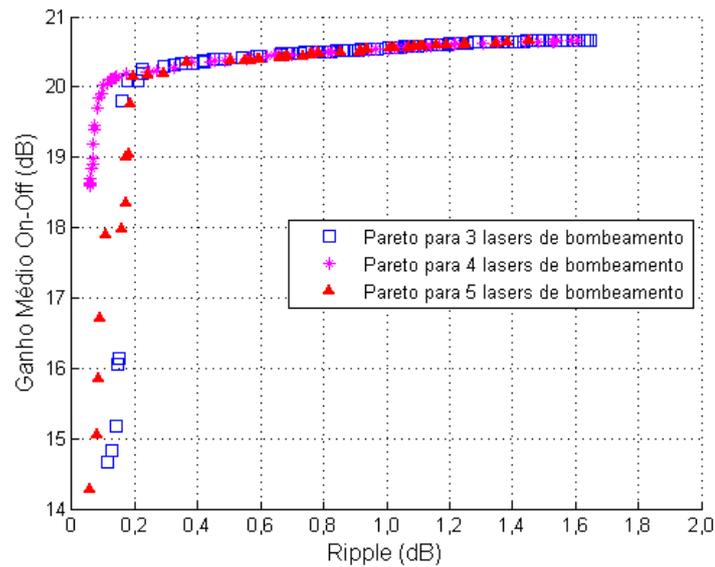


Figura 19: *Pareto fronts* finais para os amplificadores Raman com 3, 4 e 5 *lasers* de bombeamento.

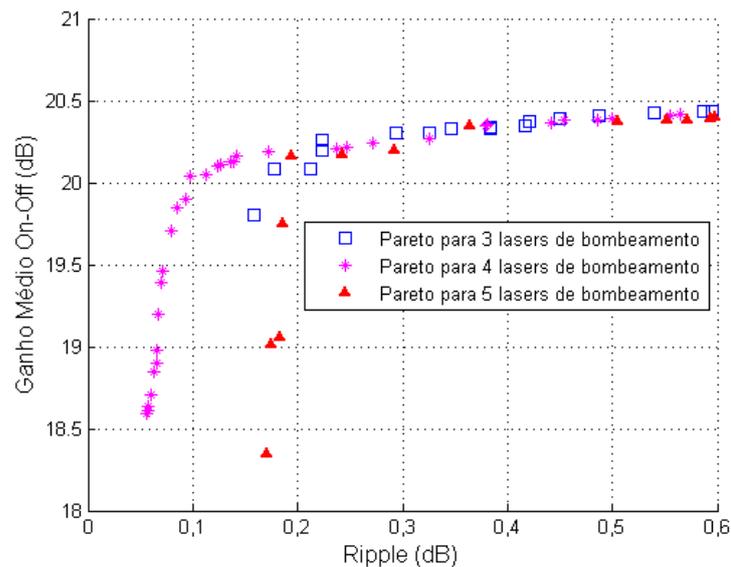


Figura 20: Parte dos *Pareto fronts* finais para os amplificadores Raman com 3, 4 e 5 *lasers* de bombeamento.

6 *Conclusões e Trabalhos Futuros*

“ *Man is a tool-using animal.*

Without tools he is nothing,

with tools he is all.”

– **Thomas Carlyle**

Neste trabalho, foi desenvolvida uma ferramenta para otimização multiobjetiva do ganho e do *ripple* de amplificadores Raman com múltiplos *lasers* de bombeamento considerando simultaneamente a maximização do ganho e a minimização do *ripple*. Na literatura, existem alguns trabalhos que propõe métodos de otimização do ganho e do *ripple* em amplificadores Raman. Entretanto, é a primeira vez, até onde vai o conhecimento do autor, em que se utiliza uma abordagem multiobjetivo no processo de otimização de amplificadores Raman.

A natureza conflitante entre ganho e *ripple* em amplificadores Raman sugeria que a aplicação de algoritmos multiobjetivos poderia levar a resultados mais promissores do que outros métodos propostos na literatura. Essa hipótese motivou o desenvolvimento deste trabalho, e foi confirmada pelos resultados obtidos. Para validar a hipótese levantada, optou-se por utilizar um algoritmo multiobjetivo baseado em enxame de partículas, devido ao fato deles serem mais eficazes e apresentam rápida convergência em relação à outras abordagens. O algoritmo utilizado foi o MOPSO-CDR.

Para validar a utilização do MOPSO-CDR no processo de otimização, foram realizados experimentos no sentido de se otimizar amplificadores Raman com 3, 4 e 5 *lasers* de bombeamento. É importante destacar que todos os amplificadores Raman otimizados eram amplificadores distribuídos na configuração contra-propagante em uma fibra óptica monomodo com 75 km de comprimento. Nos experimentos realizados, foi considerada a amplificação de 20 canais na banda C. Os resultados dos experimentos mostraram que todos os amplificadores projetados a partir do MOPSO-CDR apresentaram altos valores de ganho com baixos valores de *ripple* para banda de sinais analisada. O MOPSO-CDR

foi capaz de produzir amplificadores com ganho médio *on-off* em torno de 20 dB e *ripple* menor que 0,2 dB. Desta forma, foi comprovada que a utilização de algoritmos multiobjetivos baseados em enxame de partículas é uma alternativa satisfatória e promissora no projeto de amplificadores Raman.

Outro aspecto importante da ferramenta é que ela é capaz de produzir uma grande quantidade de soluções de projeto eficientes com ganho médio *on-off* entre 20 dB e 21 dB e *ripple* menor que 1 dB. Com isso, o projetista tem várias soluções de projeto para o mesmo amplificador, de modo que ele pode selecionar a solução de projeto que representa o menor custo para a construção do amplificador. Desta forma, a ferramenta proposta tem um forte viés econômico para a indústria de telecomunicações, pois, por meio dela, as empresas de telecomunicações podem reduzir seus custos na fabricação de amplificadores Raman banda larga de alto desempenho.

A realização deste trabalho também motivou várias propostas de trabalhos futuros. Algumas dessas propostas são apresentadas a seguir.

- **Otimização de amplificadores Raman discretos.** Neste trabalho foi realizada a otimização de amplificadores Raman distribuídos. O mesmo procedimento de otimização desenvolvido neste trabalho pode ser utilizado em amplificadores Raman discretos.
- **Adicionar o objetivo custo na otimização multiobjetivo dos amplificadores.** O custo dos amplificadores Raman depende da potência dos *lasers* utilizados. Neste sentido, pode-se realizar a otimização de amplificadores Raman envolvendo o *ripple*, o ganho médio *on-off*, e o custo associado com a fabricação do amplificador.
- **Otimização de amplificadores Raman com um número maior de bombeios.** No Capítulo 5 deste trabalho, foi observado que com o aumento do número de *lasers* de bombeamento, o número de soluções não-dominadas encontradas pelo algoritmo diminui. Desta forma, pode-se realizar uma pesquisa sobre o desempenho da ferramenta ao se otimizar amplificadores Raman com um número maior de *lasers* de bombeamento.

Referências

- [1] RAMAN, C. V.; KRISHNAM, K. S. A new type of secondary radiation. *Nature*, v. 121, p. 501–502, Fevereiro 1928.
- [2] ECKHARDT, G. et al. Stimulated raman scattering from organic liquids. *Phys. Rev. Lett.*, p. 455–457, Dezembro 1962.
- [3] ECKHARDT, G.; BORTFELD, D. P.; GELLER, M. Stimulated emission of stokes and anti-stokes raman lines from diamond, calcite, and α -sulfur single crystals. *Appl. Phys. Lett.*, v. 3, n. 8, p. 137–138, Outubro 1963.
- [4] WOODBURY, E. J.; NG, W. K. Ruby laser operation in the near ir. *Proceedings of the IRE*, p. 2367, Novembro 1962.
- [5] STOLEN, R. H.; IPPEN, E. P.; TYNES, A. R. Raman oscillation in glass optical waveguides. *Appl. Phys. Lett.*, v. 20, n. 2, p. 62–64, Janeiro 1972.
- [6] STOLEN, R. H.; IPPEN, E. P. Raman gain in glass optical waveguides. *Appl. Phys. Lett.*, v. 22, n. 6, p. 276–278, Março 1973.
- [7] BROMAGE, J. Raman amplification for fiber communications systems. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, v. 22, n. 1, p. 79–93, Janeiro 2004.
- [8] ISLAM, M. N. Raman amplifiers for telecommunications. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, v. 8, n. 3, p. 548–559, Maio/Junho 2002.
- [9] EMORI, Y.; NAMIKI, S. 100 nm bandwidth flat-gain raman amplifiers pumped and gain-equalised by 12-wavelength-channel wdm laser diode unit. *Electronics Letters*, v. 35, n. 16, p. 1355–1356, Maio 1999.
- [10] FERREIRA, G. C. M. *Análise e Otimização de Sistemas Ópticos com Amplificadores Raman*. Monografia (Projeto de Graduação) — UFES, Vitória-ES, 2008.
- [11] BECKER, P. C.; OLSSON, N. A.; SIMPSON, J. R. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology*. San Diego, CA, EUA: Academic Press, 1999.
- [12] HEADLEY, C.; AGRAWAL, G. P. *Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems*. San Diego, California, EUA: Elsevier Academic Press, 2005.
- [13] PERLIN, V. E.; WINFUL, H. G. Optimal design of flat-gain wide-band fiber raman amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, v. 20, n. 2, p. 250–254, Fevereiro 2002.
- [14] YAN, M. et al. Automatic design scheme for optical-fiber raman amplifiers backward-pumped with multiple laser diode pumps. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 13, n. 9, p. 948–950, Setembro 2001.

- [15] XIAO, P. et al. A new optimal algorithm for multipump sources of distributed fiber raman amplifier. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 3, p. 206–208, 2003.
- [16] MOWLA, A.; GRANPAYEH, N. Design of a flat-gain multipumped distributed fiber raman amplifier by particle swarm optimization. *J. Opt. Soc. Am. A*, v. 25, n. 12, p. 3059–3066, Dezembro 2008.
- [17] ENGELBRECHT, A. P. *Computational Intelligence An Introduction*. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England: John Wiley & Sons, 2007.
- [18] ZITZLER, E.; THIELE, L. Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength pareto approach. *IEEE transactions on evolutionary computation*, v. 3, n. 4, p. 257–271, Setembro 1999.
- [19] SANTANA, R. A.; PONTES, M. R.; BASTOS-FILHO, C. J. A. A multiple objective particle swarm optimization approach using crowding distance and roulette wheel. In: *ISDA '09: Proceedings of the 2009 Ninth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*. Pisa, Itália: IEEE, 2009.
- [20] BOYD, R. W. *Nonlinear Optics*. San Diego, California, EUA: Elsevier Academic Press, 2008.
- [21] CANI, S. P. N. *Uma Contribuição ao Modelamento Analítico em Amplificadores Raman*. Tese (Doutorado) — Prog. Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFES, Vitória-ES, 2007.
- [22] BAUMGARTNER, U.; MAGELE, C.; RENHART, W. Pareto optimality and particle swarm optimization. *IEEE Transactions on magnetics*, v. 40, n. 2, p. 1172–1175, Março 2004.
- [23] KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*. Perth, Aust: IEEE, 1995. p. 1945–1948.
- [24] BRATTON, D.; KENNEDY, J. Defining a standard for particule swarm optimization. In: *Proceedings of the 2007 IEEE Swarm Intelligence Symposium (SIS 2007)*. Honolulu, HI: IEEE, 2007.
- [25] COELLO, C. A. C.; PULIDO, G. T.; LECHUGA, M. S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2004.
- [26] CHIU, S.-Y. et al. Cross searching strategy for multi-objective particle swarm optimization. In: *2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2007*. Singapore: IEEE, 2007. p. 3135–3141.
- [27] DEB A. PRATAB, S. A. K.; MEYARIVAN, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 6, n. 2, p. 182–197, Abril 2002.
- [28] ZITZLER, E. *Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications*. Tese (Doutorado) — ETH Zurich, 1999.