

GUSTAVO CARNELLI MARIOTTO FERREIRA

**APRIMORAMENTO DE MODELOS PARA A OTIMIZAÇÃO DE
AMPLIFICADORES RAMAN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Profa. Dra. Maria José Pontes

Co-orientador: Profa. Dra. Shirley Peroni Neves Cani

VITÓRIA

2010

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

F383a Ferreira, Gustavo Carnelli Mariotto, 1985-
Aprimoramento de modelos para a otimização de
amplificadores Raman / Gustavo Carnelli Mariotto Ferreira. – 2010.
68 f. : il.

Orientadora: Maria José Pontes.
Co-Orientadora: Shirley Peroni Neves Cani.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Comunicações ópticas. 2. Amplificadores ópticos. 3. Raman,
Efeito de. 4. Sistemas de telecomunicação. 5. Modelagem de
dados. I. Pontes, Maria José. II. Cani, Shirley Peroni Neves, 1975-.
III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico.
IV. Título.

CDU: 621.3

GUSTAVO CARNELLI MARIOTTO FERREIRA

**APRIMORAMENTO DE MODELOS PARA A OTIMIZAÇÃO DE
AMPLIFICADORES RAMAN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 10 de Dezembro de 2010.

COMISSÃO EXAMINADORA

Profa. Dra. Maria José Pontes
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Profa. Dra. Shirley Peroni Neves Cani
Instituto Federal do Espírito Santo
Co-orientador

Prof. Dr. Carmelo José Albanez Bastos Filho
Universidade de Pernambuco

Dr. Stefan Tenenbaum
PadTec S/A

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

À minha família.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a todos aqueles que acreditaram em mim e que, de uma forma ou de outra, me ajudaram a desenvolver este trabalho. Aos amigos do LabTel, que conseguiram tornar mesmo os dias em que tudo dava errado em um dia agradável. À Marcia, por estar sempre disposta a parar qualquer coisa para poder me ajudar nas minhas dúvidas, por mais insignificantes que fossem, e por ter contribuído com diversas idéias que permitiram a realização desta dissertação como ela é hoje. Às minhas orientadores Zezé e Shirley, por terem me apresentado e me ensinado tudo o que sei sobre amplificadores Raman. Ao Segatto, por ter me apresentado aos algoritmos genéticos. Ao Pablo, por ter me disponibilizado o seu estudo sobre o Método de Compensação Geométrica, que acabou se tornando o ponto central desta dissertação.

Agradeço também à Natália, minha namorada, por ter me aturado ao longo de toda a dissertação e por ter sempre acreditado que eu conseguiria terminá-la, mesmo nos momentos que eu pensava em desistir. Também gostaria de agradecer a toda a minha família pelo apoio e carinho que sempre me deram, principalmente aos meus pais, que sempre estiveram comigo e, entre cobranças e apoio permitiram que eu seja quem sou hoje.

Por fim, gostaria de agradecer à FAPES pelo apoio financeiro que permitiu que eu me dedicasse integralmente aos estudos durante a maior parte do mestrado.

O insucesso é apenas uma oportunidade para recomeçar de novo com mais inteligência. (Henry Ford)

Resumo

O surgimento dos amplificadores ópticos na década de 90 possibilitou a utilização de multiplexação por comprimentos de onda nos sistemas de comunicações ópticas e o aumento nas taxas de transmissão. É dentro desta categoria de amplificadores ópticos que se encaixam os amplificadores Raman. Esta tecnologia permite a amplificação de diversos comprimentos de onda de forma simultânea e transparente. Contudo, apresenta a dificuldade de se obter uma banda plana de amplificação, especialmente, quando essas bandas começavam a aumentar de tamanho. É baseado neste problema que esta dissertação busca apresentar uma metodologia de otimização baseada em um algoritmo híbrido, que mistura componentes de algoritmos genéticos com um método de compensação geométrica, para otimizar os parâmetros de amplificadores Raman de forma a atender a certos requisitos de projeto. Isto significa determinar o menor número de *lasers* de bombeio necessários para atender aos parâmetros de projeto de ganho *on-off* mínimo, requerido pelo projetista e *ripple* máximo permitido pelo sistema, dentro de uma largura de banda de sinais extensa, como a banda C + L.

Este estudo permitiu verificar que o algoritmo híbrido é capaz de encontrar soluções efetivas de banda plana mesmo em condições de bandas largas (banda C + L), obtendo resultados melhores do que aqueles encontrados por algoritmos genéticos puros aplicados ao mesmo problema.

Abstract

The emergence of optical amplifiers in the nineties, enabled the use of wavelength multiplexing in optical communication systems and the increase in the transmission rates. The Raman amplifiers is inserted in this category of optical amplifiers. This technology allows the amplification of several wavelength simultaneously and transparently. However, it presents the difficulty of obtaining a plain amplification band, specially when this bands started to increase in extension. It was based in this problem that this dissertation proposes a optimization method based in a hybrid algorithm, that mixes components of genetic algorithms with a geometric compensation technic, in order to optimize the parameters of Raman amplifiers, making it possible to achieve certain project requirements. This means one should determine the smallest number of laser pumps necessary to meet the project parameters of minimal gain required, and the maximum ripple allowed by the system, inside a wide signal bandwidth, like the C + L band.

This study verified that the hybrid algorithm is capable of finding efficient solutions of plain bandwidth, even in wide band conditions (C + L band), obtaining better results than those obtained with pure genetic algorithms applied to the same problem.

Lista de Figuras

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Espalhamento Raman estimulado. | 26 |
| 2 | Perfil de Ganho Raman para diferentes tipos de fibra. | 27 |
| 3 | Configuração de bombeio contra-propagante. | 28 |
| 4 | Configurações para amplificadores Raman (a) Discreta; (b) Distribuída. | 30 |
| 5 | Modelagem de amplificadores Raman. | 32 |
| 6 | Métodos de Otimização Global. | 38 |
| 7 | Fluxograma do Funcionamento de um Algoritmo Genético. | 39 |
| 8 | Probabilidade de Escolha de Indivíduo Baseado em Valores de Fitness. | 41 |
| 9 | Exemplo de cruzamento realizado em um único ponto. | 43 |
| 10 | Exemplo de mutação realizado em um único ponto. | 43 |
| 11 | Função erro para o Método de Compensação Geométrica. | 49 |
| 12 | Fluxograma do HGA aplicado ao projeto de amplificadores Raman. | 50 |
| 13 | Curvas de Ganho <i>On-Off</i> para dois amplificadores distintos. | 53 |
| 14 | Configuração do amplificador distribuído contendo fibra SMF em esquema de bombeio contra-propagante. | 55 |
| 15 | Convergência do algoritmo híbrido com 5 bombeamentos. | 59 |

| | | |
|----|---|----|
| 16 | Variação do ganho <i>On-Off</i> em função do número de <i>lasers</i> de bombeio para canais na (a) banda C e (b) banda C+L. | 60 |
| 17 | Ganho <i>On-Off</i> obtido para amplificadores com 2 e 4 <i>lasers</i> de bombeio para HGA. | 62 |

Lista de Tabelas

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Normalização dos valores de <i>fitness</i> e probabilidade de escolha. | 41 |
| 2 | Parâmetros das gaussianas para aproximação da curva de ganho Raman. | 45 |
| 3 | Parâmetros do sistema com fibra SMF. | 55 |
| 4 | Parâmetros do amplificador Raman utilizados pelos algoritmos de otimização. | 56 |
| 5 | Proporção da população inicial baseada na técnica de compensação geométrica | 58 |
| 6 | Comparação de ganho entre o algoritmo GA padrão e GA com GCT. | 61 |
| 7 | Comparação entre um algoritmo GA e HGA (tempo em segundos). | 62 |

Lista de Siglas

| | |
|------|--|
| ASE | <i>Amplified Spontaneous Emission</i> |
| CW | <i>Continuous Wave</i> |
| DCF | <i>Dispersion Compensating Fiber</i> |
| DRA | <i>Distributed Raman Amplifier</i> |
| GDRA | <i>Ganho do Amplificador Raman Distribuído</i> |
| DSF | <i>Dispersion Shifted Fiber</i> |
| EDFA | <i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> |
| EA | <i>Evolutionary Algorithm</i> |
| GCT | <i>Geometric Compensation Technique</i> |
| GA | <i>Genetic Algorithm</i> |
| HGA | <i>Hybrid Genetic Algorithm</i> |
| MOP | <i>Multi-Objective Optimization Problem</i> |
| NF | <i>Noise Figure</i> |
| OSNR | <i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i> |
| RBS | <i>Rayleigh Backscattering</i> |
| SMF | <i>Single-Mode Fiber</i> |
| SRS | <i>Stimulated Raman Scattering</i> |
| WDM | <i>Wavelength Division Multiplexing</i> |

Sumário

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 17 |
| 1.1 | Evolução das Comunicações Óticas | 18 |
| 1.2 | Projeto de Amplificadores Raman | 20 |
| 1.3 | Algoritmos de Otimização | 21 |
| 1.4 | Escopo da Dissertação | 21 |
| 1.5 | Publicações | 23 |
| 2 | Aspectos Teóricos dos Amplificadores Raman | 24 |
| 2.1 | Espalhamento Estimulado de Raman (SRS) | 25 |
| 2.2 | Coeficiente de Ganho Raman | 26 |
| 2.3 | Esquema de Bombeio do Amplificador | 27 |
| 2.4 | Configurações do Amplificador | 29 |
| 3 | Algoritmos Computacionais para Modelagem e Otimização | 31 |
| 3.1 | Solução Analítica para a Modelagem dos Amplificadores Raman | 31 |
| 3.2 | Algoritmos de Otimização | 36 |
| 3.2.1 | Algoritmos Genéticos | 39 |
| 3.2.2 | Método de Compensação Geométrica | 44 |
| 3.2.3 | Algoritmo Genético Híbrido | 49 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | Resultados | 52 |
| 4.1 | Introdução | 52 |
| 4.2 | Configuração do Amplificador | 54 |
| 4.3 | Otimização do Amplificador | 55 |
| 4.4 | Análise do Amplificador Otimizado com o GA Híbrido | 57 |
| 4.5 | Discussão dos Resultados | 63 |
| 5 | Conclusões | 65 |
| | Referências | 67 |

1 *Introdução*

O advento das comunicações óticas possibilitou que se atingissem altas taxas de transmissão a distâncias antes inimagináveis. Para que se atingisse níveis cada vez maiores, tanto com relação à distância do enlace, quanto com relação às taxas, foi necessário um esforço muito grande no sentido de desenvolvimento de componentes e dispositivos óticos.

Para atender à demanda e ao potencial de crescimento para as taxas de transmissão e enlaces de comunicações óticas, era importante contornar os problemas de substituição das interfaces ótico-eletro-ótico, utilizadas para regenerar os sinais transmitidos. Além de serem dependentes das taxas de bits, cada comprimento de onda utilizado necessitava de um regenerador, o que encarecia ainda mais o sistema. E apoiado nesta necessidade, na década de 80 ocorreram as primeiras demonstrações experimentais de amplificadores em fibra, com amplificadores EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) [1]. Somente durante a década de 90, surgiram os primeiros amplificadores óticos comerciais [2].

Após o rápido desenvolvimento dos EDFAs, os amplificadores óticos baseados no efeito de espalhamento Raman estimulado passaram a ser melhor estudados.

Os amplificadores Raman foram inicialmente preteridos com relação aos EDFAs [3], apesar de apresentarem vantagens, como a flexibilidade na escolha da banda de sinais a ser amplificada, capacidade de utilizar fibras já instaladas e altos valores de OSNR (*Optical Signal-to-Noise Ratio*), em detrimento a um

menor ganho.

Uma das razões que postergou o desenvolvimento e utilização comercial de amplificadores Raman foi a dificuldade de se obter *lasers* com potências elevadas, que são necessários para a operação desses amplificadores. Porém, com o desenvolvimento da tecnologia de *lasers* de alta potência na região de 14xx nm [4], os amplificadores Raman passaram a ser bastante explorados, inclusive em enlaces que já continham EDFAs.

Devido às vantagens acima mencionadas e aos *lasers* de alta potência disponíveis em 14xx nm, os amplificadores Raman ganharam cada vez mais espaço.

Apesar da tecnologia atual de *lasers* possibilitar a implantação dos amplificadores Raman em sistemas ópticos WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), permanece ainda como questão importante a escolha criteriosa dos comprimentos de onda e das potências dos *lasers* de bombeio que fornecerão ganho adequado e plano em toda a banda amplificada. A otimização do ganho e do *ripple* de ganho, que consiste na diferença entre os valores de máximo e mínimo do ganho, são parâmetros fundamentais que devem ser estabelecidos e atendidos no projeto destes amplificadores.

1.1 Evolução das Comunicações Óticas

O surgimento dos *lasers* na década de 1952 foi decisivo para o desenvolvimento das comunicações óticas. A invenção funcionou como um propulsor para as pesquisas, o que permitiu que, em 1966, citassem pela primeira vez o uso de fibra ótica como meio de transmissão [5]. As primeiras fibras apresentavam atenuações muito elevadas, o que prejudicava a sua utilização mesmo em enlaces com distâncias modestas de alguns quilômetros. Todavia, com os avanços na tecnologia de fabricação de fibras, é possível obter atualmente fibras com atenuação menores do que 1 dB por quilômetro [6], sendo o valor de 0,2 dB/km

característico para as fibras monomodo padrão [7].

Após o desenvolvimento das fibras com baixa atenuação é que os sistemas de telecomunicação por fibras ópticas começaram a ser realmente implantados em enlaces comerciais. Ainda assim, as perdas na fibra continuavam a ser um limitador da distância dos enlaces.

À medida em que aumentou a demanda por enlaces mais longos, a limitação do alcance desses enlaces devido à atenuação da fibra teve que ser contornada. Inicialmente, foram utilizados regeneradores elétricos para compensar tais perdas. Nestes regeneradores, ocorre a conversão eletro-óptica, que permite transformar o sinal óptico que se propaga na fibra para o domínio elétrico e amplificá-los. Após amplificado, o sinal elétrico é reconvertido para o domínio óptico para a transmissão no enlace. Esse tipo de regeneração da atenuação apresentava grandes limitações pelo fato de serem caros e terem taxas de transmissão fixas, além de que cada comprimento de onda transmitido necessitaria de um regenerador próprio. O desenvolvimento dos amplificadores ópticos substituíram os regeneradores elétricos e permitiram resolver a limitação da atenuação dos enlaces de longa distância [4].

Entre os amplificadores ópticos que se desenvolveram desde então, as tecnologias mais utilizadas são as que envolvem os EDFAs [3] e os amplificadores Raman [4]. Embora o processo de amplificação em fibras ópticas já ser conhecido desde os anos 60 [8] e anos 80 [9], respectivamente para EDFAs e amplificador Raman, o desenvolvimento das tecnologias desses amplificadores surgiu por volta dos anos 90. Isto possibilitou um grande avanço nas comunicações ópticas por permitirem um aumento nas taxas de transmissão, devido à transparência destes componentes quanto à taxa a ser transmitida, além de viabilizar a instalação de enlaces de longa distância sem a necessidade de regeneradores elétricos, possibilitando assim as transmissões WDM (*Wavelength Division Multiplexing*).

1.2 Projeto de Amplificadores Raman

Considerando que os amplificadores ópticos desempenham um papel decisivo na operação de enlaces de alta capacidade, *i.e.* altas taxas de transmissão (Gb/s) e/ou longas distâncias (centenas de quilômetros), o projeto desses dispositivos é crítico para a operação de sistemas de comunicações ópticas. É neste contexto que os amplificadores Raman são analisados, cujo funcionamento está ligado diretamente às características de seus *lasers* de bombeio.

Os bombeios são *lasers* de alta potência, que têm por finalidade, fornecer energia em forma de ganho para os sinais transmitidos ao longo do enlace. Os principais parâmetros dos amplificadores Raman com relação aos bombeios correspondem à quantidade de tais *lasers*, o comprimento de onda onde estão alocados e suas respectivas potências. O ajuste de cada uma dessas variáveis é capaz de alterar drasticamente as características de resposta de ganho e *ripple* do sistema.

Contudo, a decisão sobre o número de *lasers* de bombeio a ser utilizado, seus comprimentos de onda e potência, não é de fácil determinação, devido às interações entre bombeios e sinais. As equações que modelam o funcionamento dos amplificadores Raman são equações diferenciais não-lineares acopladas [4] que exigem soluções numéricas com alto custo computacional. Este é um problema onde o objetivo é, em geral, obter não somente um alto ganho, como também um *ripple* de ganho baixo, o que caracteriza um problema de otimização multi-objetivo.

Outro fator extremamente importante no projeto de amplificadores Raman é seu custo de projeto. Com a finalidade de reduzir ao máximo este custo, busca-se uma diminuição do número de *lasers* de bombeio utilizados nos amplificadores presentes em um enlace, o que faz com que a otimização se torne ainda mais importante para obter bons resultados.

1.3 Algoritmos de Otimização

Dentre os algoritmos de otimização, há basicamente duas classes de algoritmos que podem ser utilizados para a obtenção de boas respostas dentro de um determinado espaço de solução, sendo estes determinísticos ou probabilísticos [10].

No caso determinístico, que são os algoritmos clássicos de otimização, há os que utilizam a programação linear e a não-linear. Ambas têm os objetivos e restrições definidas por funções matemáticas e, como condição inicial a função objetivo deve ser contínua e diferenciável no espaço onde se faz a busca.

Já no caso probabilístico, os algoritmos introduzem dados e tratamento estocástico ao processo de otimização. Algumas vantagens apresentadas com relação aos algoritmos determinísticos são: o fato de não haver a necessidade de obter uma expressão para representar a função objetivo e não existirem restrições matemáticas, para realizar buscas simultâneas no espaço de soluções.

Entre os algoritmos de otimização probabilísticos, há os algoritmos evolucionários (EAs - *Evolutionary Algorithms*), que se baseiam em um modelo semelhante ao da evolução orgânica [11]. Nesta classe de algoritmos, encontram-se os algoritmos genéticos (GA - *Genetic Algorithm*), que são ferramentas bastante difundidas, e de grande utilidade para problemas de otimização que envolvem a determinação simultânea de múltiplos parâmetros. Este é o caso da escolha dos *lasers* de bombeio envolvida no projeto de amplificadores Raman.

1.4 Escopo da Dissertação

O problema de otimização dos amplificadores Raman exige a determinação simultânea de ao menos dois parâmetros, ganho e *ripple* de ganho. Esses valores otimizados definem os *lasers* de bombeio a serem utilizados, e é de ex-

tréma importância para o bom funcionamento dos amplificadores em sistemas de comunicação e podem contribuir para reduzir seus altos custos de fabricação. Nesse contexto, muitos estudos vêm sendo realizados com a intenção de propor um método eficiente na busca de soluções para o problema de alocação dos comprimentos de onda dos *lasers* de bombeio e suas respectivas potências.

Este trabalho propõe estudar algoritmos genéticos para solucionar o problema de otimização dos comprimentos de onda e potências dos bombeios utilizados nos amplificadores Raman para amplificar bandas de sinais tais como a banda convencional (*C-band* de 1525 nm a 1560 nm) e a banda longa (*L-band* de 1565 nm a 1625 nm). Para isso, será utilizado um método analítico aproximado [12] capaz de modelar o funcionamento do amplificador em seu estado estacionário, ou seja, o funcionamento CW (*Continuous Wave*). Esse modelo servirá de base para os algoritmos de otimização.

Dois algoritmos de otimização serão utilizados, um genético puro e um algoritmo híbrido, que além dos conceitos de GAs, inclui também um método de compensação geométrica (GCT - *Geometric Compensation Technic*) [13]. O GCT é utilizado como uma ferramenta para realizar buscas em regiões pré-selecionadas onde há boas soluções. A análise das respostas de ambos os algoritmos é feita considerando o número de bombeios obtido pela solução final de cada uma das rotinas implementadas, além do ganho *on-off* e *ripple* obtidos pela mesma configuração do amplificador considerado. Estes parâmetros de saída foram escolhidos por serem as variáveis mais importantes para o projeto destes dispositivos, com relação ao custo e ao desempenho do amplificador em sistemas.

Esta dissertação apresenta no Capítulo 2 os aspectos teóricos sobre o funcionamento dos amplificadores Raman. No Capítulo 3 são apresentados os modelos computacionais e algoritmos de otimização utilizados neste trabalho. Os resultados obtidos nesta pesquisa são apresentados e discutidos no Capítulo

4. O Capítulo 5 contém as conclusões deste trabalho.

1.5 Publicações

Ao longo do desenvolvimento desse trabalho foram produzidos os seguintes artigos:

- G. C. M. Ferreira, C. E. S. Castellani, S. P. N. Cani, M. J. Pontes, S. Tenenbaum, M. E. V. Segatto, “Proposta para a Otimização de Amplificadores Raman Multi-Bombeio.” em 7th International Information and Telecommunication Technologies Symposium, (Foz do Iguaçu, 2008).
- G. C. M. Ferreira, M. H. M. Paiva, M. J. Pontes e M. E. V. Segatto, M. Freitas, “Algoritmo Híbrido Genético-Fuzzy Aplicado no Projeto de Amplificadores Raman.” em XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, (Blumenau, 2009).

2 *Aspectos Teóricos dos Amplificadores Raman*

O amplificador Raman é um dispositivo óptico ativo composto basicamente de *lasers* de alta potência (da ordem de centenas de mW) utilizados como bombeio para amplificar uma banda larga de sinais propagantes em fibras ópticas. O processo de amplificação ocorre devido ao efeito não-linear de espalhamento Raman estimulado. Para se obter um melhor desempenho, os amplificadores costumam contar com mais de um *laser* de bombeio, geralmente alocados em uma região aproximadamente 100 nm abaixo daquela em que os sinais estão localizados e serão amplificados [14]. Os *lasers* de bombeio são escolhidos na faixa de 14xx nm.

Como já mencionado, os amplificadores Raman apresentam algumas vantagens quando comparados com os EDFAs. Uma das vantagens é a possibilidade de amplificar canais em qualquer região de comprimentos de onda de sinal. Desde que corretamente projetados, a capacidade de ampliar a banda de amplificação dos amplificadores Raman com *ripple* de ganho aceitável para aplicações práticas (menor ou igual a 1 dB) é feita através da adição de novos *lasers* de bombeio. Tais vantagens são especialmente importantes quando se busca a extensão do número de canais transmitidos, expandindo a operação do sistema da banda C para a utilização das bandas C+L. Outra vantagem é que esses amplificadores podem ser utilizados em enlaces já instalados.

O que possibilita essa amplificação é um mecanismo de troca de energia

entre os canais de bombeio e os canais de sinal. Esse efeito não-linear observado em fibras ópticas é conhecido por espalhamento Raman estimulado (SRS - *Stimulated Raman Scattering*). A descrição do efeito, assim como as diferentes configurações possíveis para a montagem do amplificador e o modelo computacional utilizado para realizar as simulações discutidas nesta dissertação serão discutidas a seguir.

2.1 Espalhamento Estimulado de Raman (SRS)

O SRS é o efeito não-linear através do qual se fundamenta o efeito da amplificação dos amplificadores Raman. O espalhamento Raman estimulado consiste na transferência de frações de energia de um campo óptico a outro com frequência deslocada por uma quantidade determinada pela sua energia vibracional [2]. A amplificação ocorre de forma distribuída, ou seja, na medida em que a luz se propaga, ela interage com as moléculas da fibra e sofre um espalhamento que pode ser elástico ou inelástico.

O fenômeno de espalhamento inelástico, descrito microscopicamente, ocorre quando a luz incidente nas moléculas da fibra transfere parte de sua energia para a vibração das moléculas, e outra parte é espalhada. Dessa forma, o fóton espalhado apresenta uma energia menor do que a energia presente na luz incidente. Como consequência, observa-se um deslocamento para baixo na frequência do fóton gerado [14]. A expressão para a energia do fóton é $E = h \cdot f$, onde E representa a energia do fóton, h é a constante de Planck e f caracteriza a frequência do fóton gerado.

A Figura 1 ilustra, na forma de um diagrama de energia, como se dá essa transferência de energia no processo de espalhamento inelástico da luz.

A frequência ω_p representa o fóton incidente ou a frequência de bombeio, enquanto ω_s representa o fóton gerado com menor energia que é conhecido

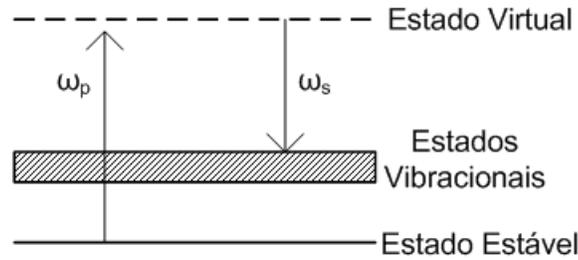


Figura 1: Espalhamento Raman estimulado.

como frequência de Stokes.

O espalhamento Raman espontâneo ocorre naturalmente de forma aleatória, uma vez que os fótons são espalhados em direções e fases diferentes e não definidas previamente. Contudo, a presença de outro sinal propagante junto ao bombeio e na mesma frequência do fóton espalhado faz com que este fóton seja espalhado em fase e na mesma direção deste sinal propagante, amplificando-o. Este princípio é chamado de espalhamento Raman estimulado.

2.2 Coeficiente de Ganho Raman

O coeficiente de ganho do amplificador em função do deslocamento de frequência, considerando como referência a frequência de bombeio, é ilustrado pela Figura 2. Pode-se observar na Figura 2 que o coeficiente de ganho Raman varia com relação ao tipo de fibra. As fibras consideradas são a monomodo padrão (SMF - *Single-Mode Fiber*), a fibra com dispersão deslocada (DSF - *Dispersion Shifted Fiber*) e a fibra compensadora de dispersão (DCF - *Dispersion Compensating Fiber*). Esta diferença do ganho ocorre devido a cada uma dessas fibras apresentarem uma área efetiva, e uma concentração de dopantes específica. Contudo, é possível observar que, apesar da grande diferença com relação aos valores do coeficiente de ganho, o perfil do ganho varia de forma aproximadamente igual para todos os tipos de fibra, sendo que o valor de pico do ganho ocorre em torno do mesmo valor de deslocamento de frequência.

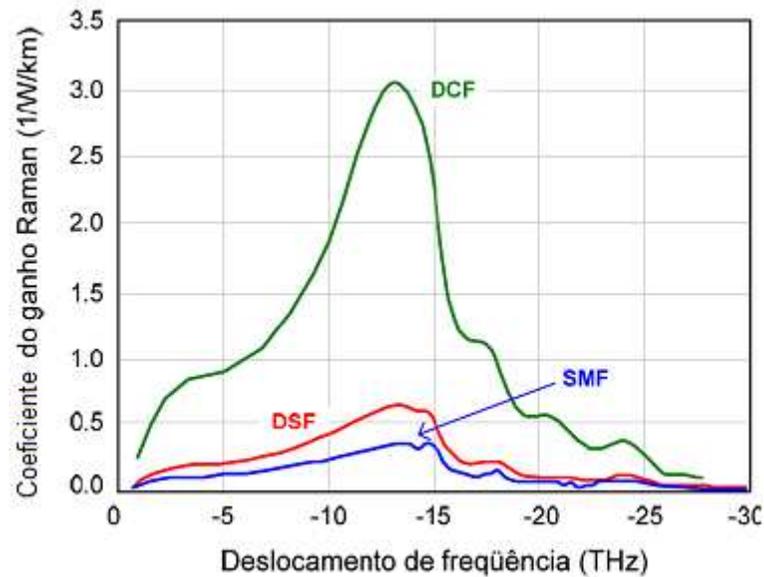


Figura 2: Perfil de Ganho Raman para diferentes tipos de fibra.

Outro aspecto importante, é que o valor máximo do coeficiente de ganho, para fibras de sílica, ocorre em um espaçamento de aproximadamente 13,2 THz [4]. Isto significa que para se obter o máximo de ganho na amplificação de um sinal, este deve ser alocado, aproximadamente, 13,2 THz abaixo da frequência do bombeio. Este valor, dado em unidades de comprimento de onda, corresponde a aproximadamente 106 nm para canais localizados na banda C (1530 nm a 1565 nm). Nesta dissertação, são considerados amplificadores Raman obtidos a partir de fibras monomodo padrão (SMF - *Single-Mode Fiber*).

2.3 Esquema de Bombeio do Amplificador

Os amplificadores Raman podem ser classificados com relação a seu esquema de bombeio. De acordo com o sentido dos bombeios em comparação ao sentido de propagação dos sinais pode-se ter amplificadores co-propagantes, contra-propagantes ou bi-direcionais.

Os amplificadores co-propagantes são aqueles em que os *lasers* de bombeio se propagam no mesmo sentido de propagação dos sinais. Neste caso, é possível

obter melhores valores de figura de ruído (NF - *Noise Figure*), ou valores de ruído mais baixos, uma vez que a amplificação é mais concentrada no início do enlace. Ou seja, tanto os sinais quanto o ruído serão amplificados no início da fibra e, então, atenuados ao longo do enlace, o que faz com que o ruído recebido seja baixo [15].

Já no caso de amplificadores contra-propagantes, que serão os casos analisados neste trabalho, os *lasers* de bombeio se propagam no sentido oposto ao dos sinais. Esse tipo de configuração garante uma amplificação com maior ganho dos sinais próximos ao fim do enlace. Pelo fato de amplificar os sinais somente próximos ao fim do enlace, a amplificação acontece quando os sinais já se encontram bastante atenuados. Isto faz com que os ganhos dos sinais não os leve a valores muito elevados, tornando-os assim menos susceptíveis a efeitos não-lineares.

Já no caso dos amplificadores bi-direcionais, as potencialidades e deficiências de cada configuração acima são combinadas [4].

A Figura 3 ilustra um amplificador Raman em fibra SMF utilizado em um sistema WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), onde a configuração de bombeio contra-propagante é considerada. Esta será a configuração utilizada nesta dissertação.

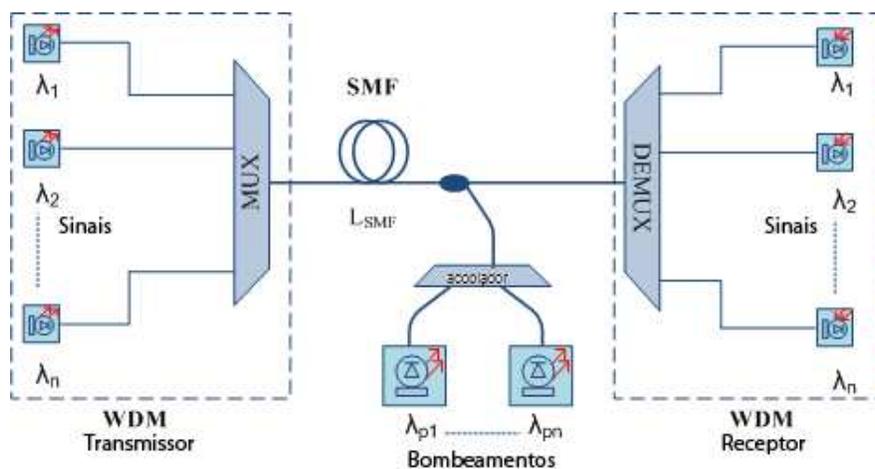


Figura 3: Configuração de bombeio contra-propagante.

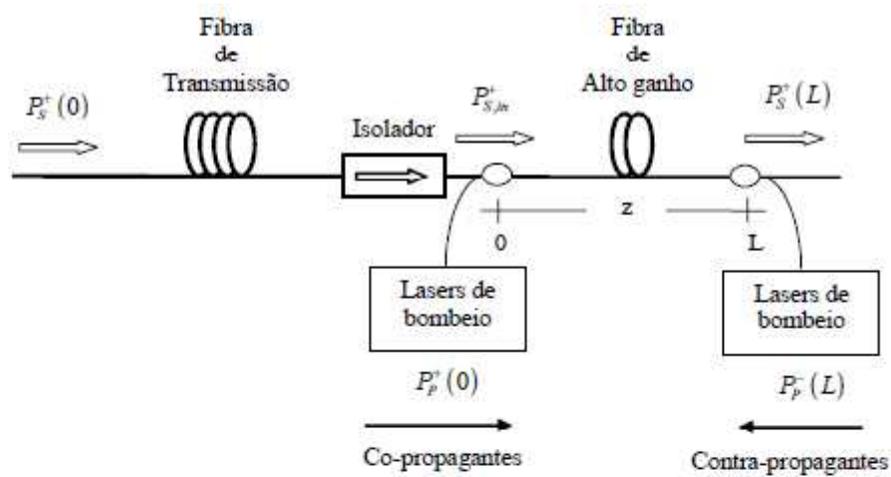
2.4 Configurações do Amplificador

Os amplificadores Raman podem ser implementados na configuração de amplificadores discretos ou distribuídos. No caso discreto, a amplificação ocorre em um trecho de fibra concentrado em uma região do enlace. Enquanto na configuração distribuída, a amplificação se observa ao longo de toda a fibra de transmissão presente no enlace. A Figura 4 ilustra as configurações do amplificador Raman.

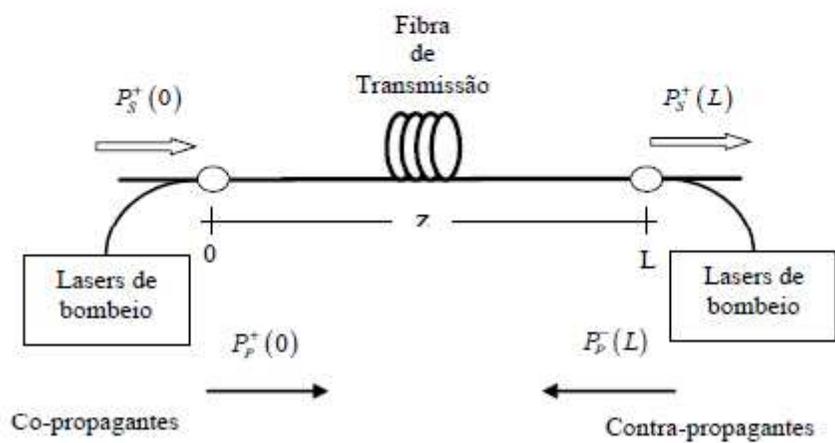
Nos amplificadores Raman discretos, a amplificação ocorre em uma fibra separada, em geral, após ter se propagado pela fibra de transmissão que compõe o enlace, conforme ilustra a Figura 4 (a). A grande vantagem deste sistema, é que podem ser utilizadas fibras diferentes ao final do enlace, como fibras DSF ou DCF que, além de compensarem a dispersão do sistema, são capazes de garantir um ganho maior, conforme ilustrado na Figura 2. Sua desvantagem é a de ter maior probabilidade de sofrer com efeitos não-lineares e ruídos.

A outra configuração possível, a distribuída (DRA - *Distributed Raman Amplifier*), consiste em utilizar a própria fibra de transmissão do enlace como meio de amplificação. A grande vantagem dessa configuração é que possibilita a aplicação em enlaces já existentes. Neste caso, não há a necessidade de se acrescentar outros módulos de fibra ou fibras dopadas. Basta adicionar o módulo contendo os *lasers* de bombeio para obter o amplificador que passará a utilizar a própria fibra de transmissão como meio de amplificação. Os amplificadores Raman distribuídos são especialmente interessantes por apresentarem valores de relação sinal-ruído óptica (OSNR - *Optical Signal-to-Noise Ratio*) muito altos, podendo inclusive chegar a 40dB [16]. São muito importantes em aplicações práticas.

Amplificadores Raman na configuração distribuída são considerados nesta dissertação.



(a)



(b)

Figura 4: Configurações para amplificadores Raman (a) Discreta; (b) Distribuída.

3 Algoritmos Computacionais para Modelagem e Otimização

Nesta seção são descritos os algoritmos utilizados neste trabalho. Inicialmente, é feita a descrição da solução analítica utilizada para a modelagem do comportamento CW do amplificador Raman. Em seguida, são descritos os algoritmos usados para a otimização dos parâmetros do amplificador Raman. Descrevem-se os princípios em que se baseia o algoritmo genético (GA - *Genetic Algorithm*) puro, ou clássico, e o algoritmo genético híbrido (HGA - *Hybrid Genetic Algorithm*) utilizado na otimização dos amplificadores a serem analisados. O HGA é basicamente um algoritmo genético que tem como mecanismo adicional uma técnica de compensação geométrica (GCT - *Geometric Compensation Technic*) para melhorar a qualidade das soluções.

3.1 Solução Analítica para a Modelagem dos Amplificadores Raman

A modelagem de amplificadores Raman baseia-se na solução das equações que descrevem o seu comportamento. Existem diversas abordagens que podem ser aplicadas de forma a se obter os resultados desejados, podendo ser realizada a análise do comportamento em estado estacionário, CW, ou através de métodos que analisam a operação do amplificador em um sistema. A análise sistêmica envolve a modulação do sinal e a transmissão de bits ao longo do amplificador.

Neste trabalho, são analisados somente casos CW, onde os efeitos considerados nos modelos usados na descrição dos amplificadores Raman estão ilustrados na Figura 5.

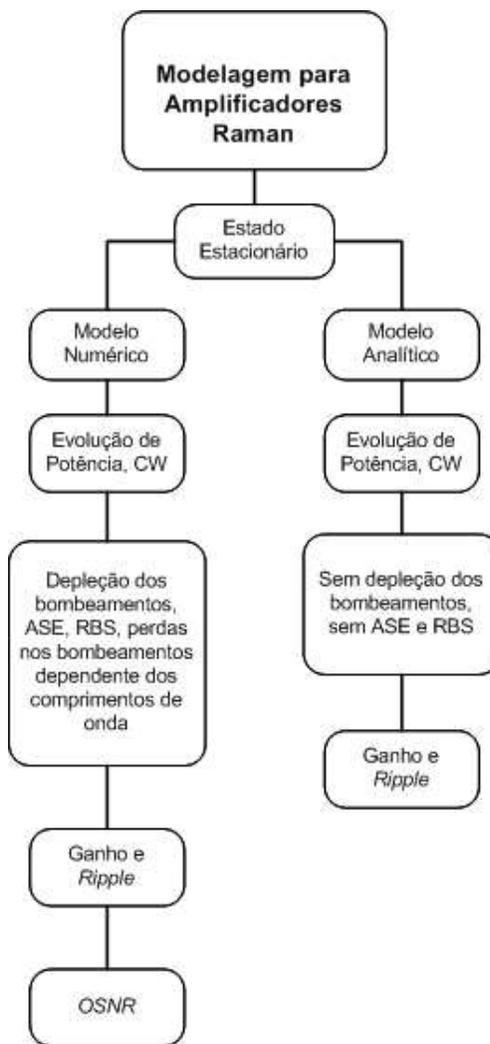


Figura 5: Modelagem de amplificadores Raman.

Como pode ser observado na Figura 5 [14], existem duas possibilidades de análise em estado estacionário, a modelagem numérica e a analítica.

No caso numérico, são considerados os principais efeitos que ocorrem dentro do sistema, tais como depleção dos bombeios pelo sinal, interação bombeio-bombeio, interação sinal-sinal, ruído de emissão espontânea (ASE - *Amplified Spontaneous Emission*) e espalhamento duplo de Rayleigh (RBS - *Double Rayleigh Backscattering*). Nessa modelagem, é possível calcular o ganho e

ripple de ganho, como também calcular a OSNR. A desvantagem dessa modelagem é que o tempo computacional é elevado, o que faz com que a análise simultânea de diversos casos, como é necessário em algoritmos de otimização como os que serão posteriormente apresentados, seja desaconselhada.

Já na abordagem através de métodos analíticos existem simplificações nas equações que permitem reduzir drasticamente o tempo de processamento computacional. No modelo analítico utilizado, os efeitos de depleção dos bombeios, ASE e RBS são desconsiderados. Embora as simplificações imponham limitações na aplicação do modelo analítico aproximado, i.e. para os casos de operação fora da região de saturação e de baixas potências de entrada onde a ASE afeta o comportamento do amplificador [12], é possível calcular de forma precisa o ganho e *ripple* do amplificador Raman. O tempo computacional é algumas ordens de grandeza inferior se comparado ao tempo de processamento do modelo numérico para canais WDM. Dessa forma, fica possível aplicá-lo a métodos de otimização de modo eficiente, principalmente quando se buscam soluções em bandas largas, com diversos canais de entrada e um número grande de *lasers* de bombeio.

Como o objetivo deste trabalho é projetar amplificadores Raman que atendam a valores específicos de ganho e *ripple* para banda de sinais específicas, será utilizado o modelo analítico para analisar diferentes configurações de amplificadores. A razão desta escolha é devido ao tempo de processamento requerido com o modelo analítico ser mais adequado para esta tarefa.

A abordagem analítica aqui utilizada foi descrita e validada em [12], [17]. Nesta abordagem, são consideradas as interações bombeio - bombeio e sinal - bombeio. A dependência de parâmetros tais como o coeficiente de atenuação de sinal com o comprimento de onda, assim como as variações na área efetiva são considerados. Contudo, como já mencionado, não são considerados os efeitos de ruído de ASE e a depleção sofrida pelos bombeios devido aos sinais.

O modelo analítico considera a evolução de potência nos amplificadores Raman contra-propagantes. As equações analíticas são obtidas considerando-se inicialmente a equação de propagação escrita para três frequências diferentes, dadas por:

$$\frac{dP_\sigma}{dz} = \alpha P_\sigma - \frac{C_{R,\sigma\mu} P_\mu}{\Gamma} P_\sigma - \frac{C_{R,\sigma\eta} P_\eta}{\Gamma} P_\sigma, \quad (3.1)$$

$$\frac{dP_\eta}{dz} = \alpha P_\eta - \frac{C_{R,\eta\mu} P_\mu}{\Gamma} P_\eta + \frac{\eta C_{R,\sigma\eta} P_\sigma}{\sigma\Gamma} P_\eta, \quad (3.2)$$

$$\frac{dP_\mu}{dz} = \alpha P_\mu + \frac{\mu C_{R,\eta\mu} P_\eta}{\eta\Gamma} P_\mu + \frac{\mu C_{R,\sigma\mu} P_\sigma}{\sigma\Gamma} P_\mu, \quad (3.3)$$

Nestas equações, μ , η e σ denotam as frequências de três bombeios diferentes, P se refere à potência óptica e α ao coeficiente de atenuação de bombeio, que nesse caso é descrito como um valor independente do comprimento de onda, sendo calculado como a média das atenuações correspondentes a cada frequência de bombeio. Já os símbolos C_R e Γ representam o coeficiente de ganho Raman e o fator de polarização, respectivamente.

Há duas etapas para a obtenção das expressões que compõem o modelo analítico. Inicialmente, as equações são agrupadas em pares, para que se possa computar a interação entre frequências. Nesta primeira etapa, apenas o efeito de atenuação é calculado, que resulta na equação de potência atenuada:

$$P_{\mu,\eta,\sigma}(z) = P_{\mu,\eta,\sigma}(L) \exp[-\alpha(L-z)], \quad (3.4)$$

sendo P a potência de entrada para as respectivas frequências representadas como sub-índices μ , η , σ e L representando o comprimento da fibra.

Após efetuar estes cálculos, inicia-se a segunda etapa onde é efetuada uma

nova iteração entre o primeiro par de bombeios, com a substituição das potências atenuadas recém calculadas em (3.1). Com a solução, obtém-se a evolução do *laser* de bombeio alocado na frequência σ . Cálculos semelhantes são efetuados para calcular os passos em η e μ . Este processo é repetido de forma a calcular a evolução ao longo de todo o comprimento da fibra.

Após essa consideração inicial para três frequências de bombeio, μ , η e σ é possível obter uma expressão capaz de calcular a evolução de potências para um número N de bombeios. Podendo, então, realizar cálculos para múltiplos bombeios e múltiplos sinais [17]:

$$P_\rho(z) = P_\rho(L) \exp[-\alpha(L-z)] \exp \left[\sum_{\psi > \rho} \left[A(\rho, \psi) \frac{1 - \exp[\Lambda(z)B(\psi, \varphi)]}{B(\psi, \varphi)} \right] \right] \exp \left[\sum_{\psi < \rho} \left[\frac{-\rho}{\psi} A(\rho, \psi) \frac{1 - \exp[\Lambda(z)B(\psi, \varphi)]}{B(\psi, \varphi)} \right] \right] \quad (3.5)$$

onde

$$A(\rho, \psi) = C_{R, \rho \psi} P_\psi(L), \quad (3.6)$$

$$\Lambda(z) = -(1 - \exp[-\alpha(L-z)]) / (\Gamma \alpha) \quad (3.7)$$

e

$$B(\psi, \varphi) = \sum_{\varphi < \psi} \psi C_{R, \psi \varphi} P_\varphi(L) / \varphi - \sum_{\varphi > \psi} C_{R, \psi \varphi} P_\varphi(L) \quad (3.8)$$

Nas expressões (3.6), (3.7) e (3.8), L representa o comprimento da fibra, P é a potência dos bombeios nas respectivas frequências ópticas ρ , ψ e φ . Já as variáveis α e $C_{R, \psi \varphi}$ representam o coeficiente de atenuação da fibra e o coeficiente de ganho Raman entre as frequências ψ e φ , respectivamente.

A partir destas equações de evolução de potência, pode-se calcular o ganho *on-off* dos sinais transmitidos através da seguinte equação:

$$G_{on-off}(v, L) = 10 \log \left(\exp \left[\int_0^L \left(\sum_N \frac{C_{R,\rho v}}{\Lambda} P_\rho(z) dz \right) \right] \right). \quad (3.9)$$

onde v representa a frequência óptica dos sinais e N é o número total de *lasers* de bombeio.

É através desta abordagem analítica que é possível calcular os valores de ganho *on-off* e *ripple* para as diversas configurações de amplificadores Raman compostas de múltiplos bombeios e sinais. A utilização deste modelo possibilita uma solução rápida utilizando os métodos de otimização descritos a seguir.

3.2 Algoritmos de Otimização

Um problema de otimização multi-objetivo (MOP - *Multi-Objective Optimization Problem*) [18] pode ser definido como um grupo de parâmetros que devem ser otimizados simultaneamente. No entanto, tais variáveis têm critérios específicos que, geralmente, são conflitantes entre si. Dessa forma, o termo otimização é aplicado, não no sentido de encontrar a melhor solução existente para determinado problema, e sim como o ato de encontrar soluções que resultam em valores aceitáveis, de acordo com determinados padrões de decisão, para todas as variáveis analisadas.

Baseado nesta definição, pode-se concluir que a questão de otimizar a configuração de um DRA de acordo com as suas respostas de ganho *on-off* e *ripple* está de acordo com as definições de um MOP, uma vez que os objetivos de otimizar ganho e *ripple*, que são as principais propostas desta dissertação, são caracterizados como parâmetros conflitantes.

Os algoritmos de otimização são classificados em duas áreas, os algoritmos determinísticos e os heurísticos. Os primeiros tentam encontrar soluções aceitáveis para os problemas, incorporando conhecimento sobre o domínio da

função problema. Muitos deles são algoritmos de busca por grafos e árvores. Tais algoritmos são bastante efetivos em problemas cujo espaço de soluções é regular, o que não ocorre com os amplificadores Raman. Já os algoritmos heurísticos, possuem mecanismos para determinar a qualidade das possíveis respostas, e técnicas de codificação e decodificação entre os domínios do problema e do algoritmo. Sua vantagem é a de encontrar boas soluções em problemas em que os métodos determinísticos teriam grandes dificuldades. Contudo, apesar de alguns códigos eventualmente encontrarem soluções ótimas, os algoritmos tendem a assegurar somente boas respostas que atendam aos parâmetros desejados, dentro de um conjunto amplo de soluções. A Figura 6 ilustra as possibilidades de algoritmos em cada uma dessas áreas.

Como a grande maioria dos MOPs, o espaço de soluções para o problema de otimização de amplificadores Raman é multi-modal e irregular [18], o que torna difícil escolher algoritmos determinísticos capazes de encontrar boas respostas. Como resultado desta dificuldade, optou-se pelo uso de métodos heurísticos, para solucionar o problema de otimização dos amplificadores Raman. O problema consiste em determinar ganhos superiores a valores de parâmetros de projeto especificados e *ripple* abaixo de 1 dB, dentro de uma banda de sinais a ser determinada também pelo projetista.

Como ilustrado na Figura 6, entre os métodos heurísticos estão os GAs [19], que estão incluídos na sub-área de Computação Evolucionária ou algoritmos evolucionários (EAs - *Evolutionary Algorithm*) [11].

Um algoritmo híbrido (HGA - *Hybrid Genetic Algorithm*) foi proposto para solucionar o problema de determinar o menor número de bombeios necessários para atender aos parâmetros de projeto de ganho *on-off* mínimo, requerido pelo projetista e *ripple* máximo permitido pelo sistema, dentro de uma largura de banda de sinais extensa, cobrindo a banda C + banda L. O algoritmo se baseia nas funções básicas de um GA, tais como reprodução, *fitness*, cruza-

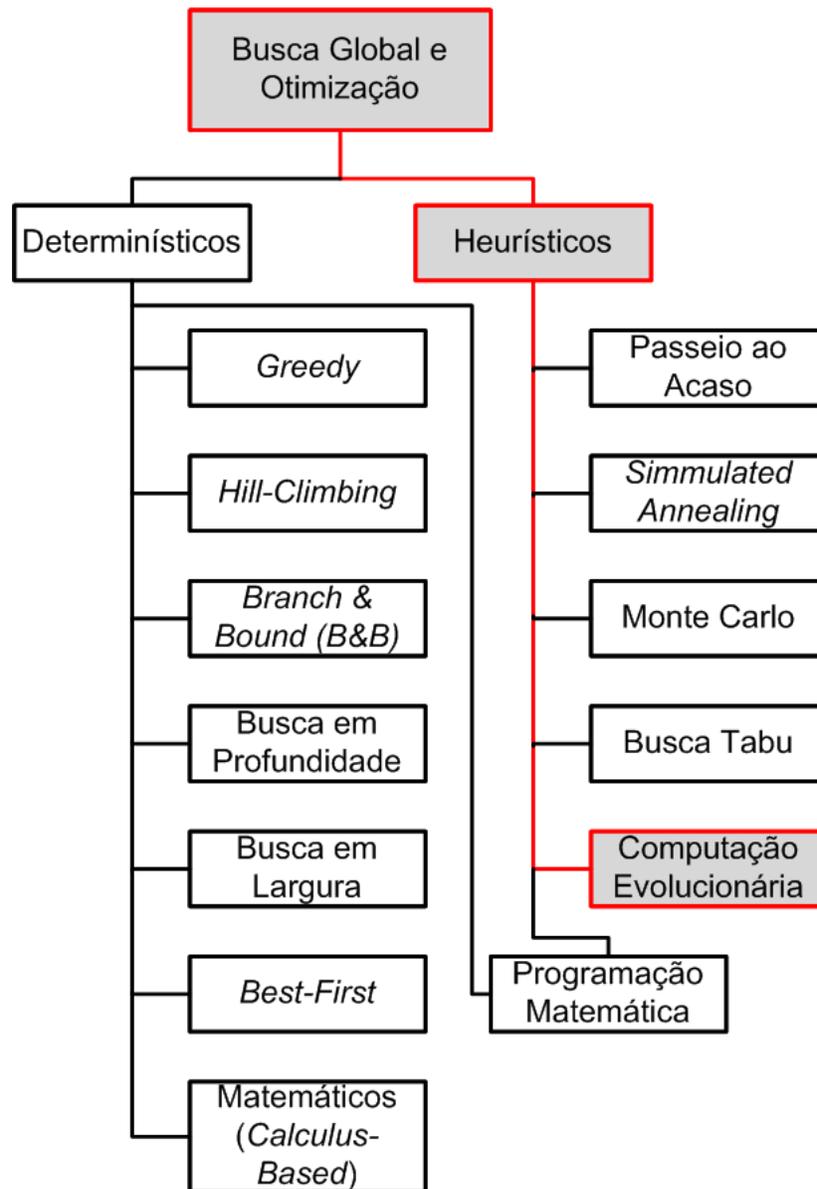


Figura 6: Métodos de Otimização Global.

mento e mutação. Todavia, a geração da população inicial não é completamente aleatória, como em um GA puro, sendo parcialmente limitada a bombeios alocados em regiões específicas, pré-determinadas pelo GCT.

Sendo assim, as próximas sub-seções serão dedicadas à descrição de um GA puro, com as funções acima descritas, do método GCT e como eles estão adaptados no HGA.

3.2.1 Algoritmos Genéticos

Os GAs são algoritmos de busca e otimização que, conforme Figura 6, são considerados como um método heurístico. O algoritmo se baseia em processos inspirados na teoria de seleção natural e genética, que também inspirou o seu nome. Suas características principais, conforme fluxograma da Figura 7, são a geração aleatória de uma população inicial de soluções, os processos de seleção dos indivíduos para a reprodução, o cruzamento, a mutação e, em alguns casos, o elitismo. Contudo, é provável que a característica mais importante do GA seja a função *fitness*, pois determinará a qualidade das respostas individuais [19].

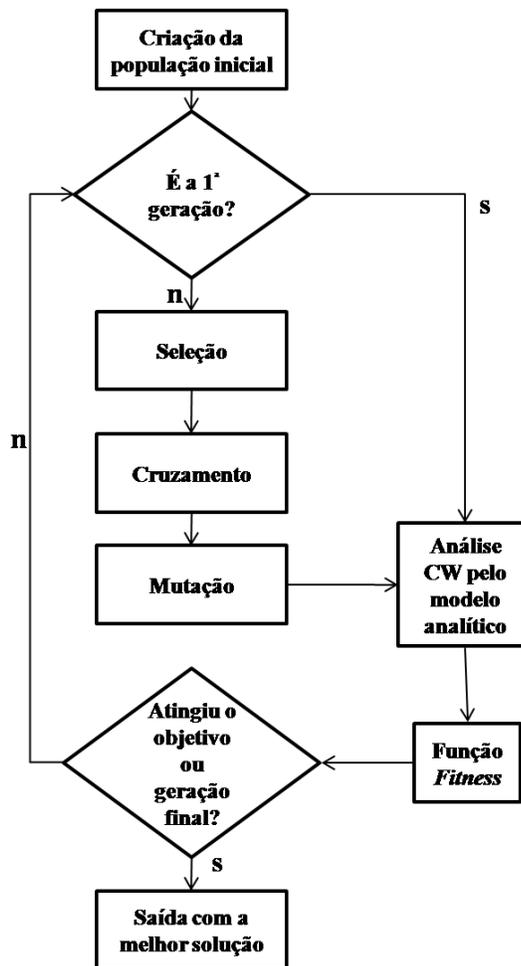


Figura 7: Fluxograma do Funcionamento de um Algoritmo Genético.

Os princípios básicos de um GA podem ser descritos de forma simplificada com um conjunto de N pontos aleatórios no espaço de soluções, consti-

tuindo uma população inicial. Posteriormente, é atribuído a cada indivíduo da população um valor *fitness* que determina a qualidade desta resposta em relação ao objetivo proposto. Por exemplo, em um processo em que se busca minimizar o valor da solução, quanto menor a resposta obtida com o indivíduo, maior será o *fitness* definido para o mesmo [20]. A partir deste valor, os dois mecanismos principais, baseados na teoria *darwiniana*, que regem a evolução são:

- a SELEÇÃO, que determina quais indivíduos serão escolhidos como pares para se manter na nova população,
- a REPRODUÇÃO, que irá combinar os pares e realizar as combinações necessárias para o surgimento de novos indivíduos para a próxima geração.

Após a geração inicial ser criada, é necessário definir uma função que descreva a qualidade de cada uma das soluções individuais. Esta pode ser considerada como a função mais importante para o bom funcionamento de um GA, uma vez que é através desta função que se classificam as soluções obtidas. Em geral, a função *fitness* é descrita matematicamente através de uma série de restrições que consideram todos os objetivos. Sendo assim, esta é a função que determinará se as soluções obtidas atendem ou não aos requisitos impostos ao sistema.

A partir do momento em que a população inicial tem o seu valor de *fitness* definido para cada um dos seus indivíduos, passa-se ao processo de seleção, onde serão definidos quais serão os pares que passarão pelo processo de reprodução e em qual ordem. Para isso, o valor de *fitness* individual será normalizado, de forma a garantir que o melhor indivíduo da população terá um valor normalizado maior do que o restante. O valor normalizado definirá a probabilidade de o indivíduo ser escolhido para a próxima geração. A Tabela 1 e a Figura 8 ilustram como os indivíduos são proporcionalmente divididos com relação aos valores de *fitness*. Neste caso, o *fitness* normalizado é dado pelo valor de *fitness* real do indivíduo, dividido pela somatória dos *fitness* da população. É

importante frisar que os valores de *fitness*, neste caso, variam entre 0 e 1.

Tabela 1: Normalização dos valores de *fitness* e probabilidade de escolha.

| INDIVÍDUO | FITNESS | FITNESS NORMALIZADO | VALOR FINAL |
|-----------|---------|---------------------|-------------|
| 1 | 0,95 | 0,19 | 0,19 |
| 2 | 0,27 | 0,05 | 0,24 |
| 3 | 0,75 | 0,15 | 0,39 |
| 4 | 0,13 | 0,03 | 0,42 |
| 5 | 0,42 | 0,08 | 0,50 |
| 6 | 0,83 | 0,16 | 0,66 |
| 7 | 0,20 | 0,04 | 0,70 |
| 8 | 0,51 | 0,10 | 0,80 |
| 9 | 0,11 | 0,02 | 0,82 |
| 10 | 0,88 | 0,17 | 1,00 |

Probabilidade de Escolha

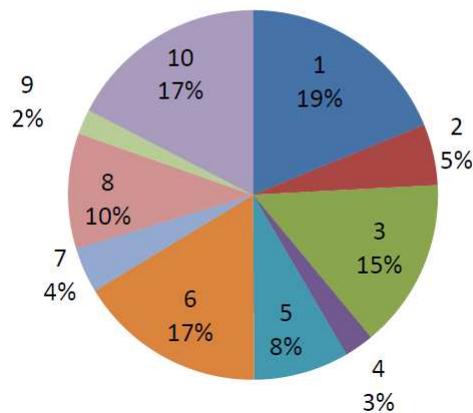


Figura 8: Probabilidade de Escolha de Indivíduo Baseado em Valores de Fitness.

Depois de realizar esta normalização é calculado um valor final relativo a cada indivíduo. Este valor é determinado pela soma dos valores da função *fitness* normalizados de cada indivíduo. Isso ocorre para facilitar a seleção dos indivíduos para formar os pares para a reprodução. Essa escolha é feita através da geração de um número aleatório entre 0 e 1. O indivíduo escolhido será aquele que apresentar o valor final imediatamente acima do número gerado. Esse processo é conhecido por método de seleção por roleta. Após a escolha de um indivíduo, o mesmo é retirado do grupo e é repetido o processo de normalização e seleção até que todos os indivíduos estejam colocados em ordem de seleção.

Dessa forma, os pares para reprodução serão formados pelo primeiro e segundo indivíduos selecionados e assim sucessivamente.

Depois de formados os pares para a reprodução, os mesmos passam por processos genéticos de cruzamento e mutação. O primeiro consiste em misturar componentes de ambos os indivíduos “pais” de forma a gerar novos indivíduos com características de ambos. Já a mutação se baseia em alterar alguma característica de um indivíduo através de uma mudança em sua estrutura. A forma mais simples de se trabalhar com esses princípios é mediante a utilização de indivíduos representados por números binários. Dessa forma, é necessário, *a priori*, codificar o indivíduo representado por um número real para um valor correspondente binário [19].

Para realizar a codificação, inicialmente se deve escolher um número de bits máximo l para o seu sistema, além dos valores limites que o seu número real pode atingir, r_{min} e r_{max} . A partir do momento que estes valores são definidos, e pressupondo que o menor valor binário que o sistema possa assumir é o valor 0 para todos os bits, temos que o número real r será representado por um número inteiro z através da expressão:

$$z = (r - r_{min}) \frac{2^l - 1}{r_{max} - r_{min}} \quad (3.10)$$

Após a conversão para um número inteiro, o valor z é então transformado de forma direta para um número binário de l bits. A decodificação se dá através da operação inversa à apresentada na Equação 3.10. Essa conversão para bits não é obrigatório, porém, ela facilita os processos de cruzamento e mutação. Um fator ao qual se deve estar atento quando se realiza a conversão para bits é o de se utilizar um número de bits suficiente para representar todos os números possíveis para os valores propostos para os indivíduos.

Depois de transformados em números binários, cada par tem a possibili-

dade de passar pelo processo de cruzamento. É definido uma probabilidade de ocorrência de cruzamento que determinará qual o percentual de pares irá passar pela operação. Os indivíduos que realizarem o cruzamento, terão uma parcela do seu *string* de bits trocado com o seu respectivo par, gerando assim dois novos indivíduos, conforme ilustrado na Figura 9.

| | |
|---------|--------------------|
| Pai 1 | 10010101011/101010 |
| Pai 2 | 00110111110/000000 |
| Filho 1 | 10010101011/000000 |
| Filho 2 | 00110111110/101010 |

Figura 9: Exemplo de cruzamento realizado em um único ponto.

Ao final do processo de cruzamento, os indivíduos têm, então, a probabilidade de passar pelo processo de mutação. Da mesma forma que o cruzamento, esse processo recebe um valor pré-definido que servirá como um parâmetro que fornece o percentual da população que passará pela mutação. A mutação consiste simplesmente em inverter um dos bits dos indivíduos, de forma a modificar o seu valor real ao final do processo. A principal finalidade deste processo é garantir uma diversificação da população, de forma que a mesma não fique para sempre limitada a regiões específicas. A Figura 10 ilustra o processo de mutação ocorrendo para 1 único bit de um indivíduo.

| | |
|------------------------|-------------|
| Indivíduo inicial | 10010101011 |
| Indivíduo após mutação | 10010111011 |

Figura 10: Exemplo de mutação realizado em um único ponto.

Os processos genéticos são repetidos nos pares selecionados da população inicial até o momento em que a nova população, constituída dos “pais” (antigos indivíduos da população inicial) e dos “filhos” (indivíduos criados a partir do

cruzamento e mutação), obtenha o mesmo número de indivíduos que a antiga geração. Após atingir este número, o restante dos pares da população prévia, ainda não analisados, são descartados. Esse processo se repete ao longo de um número definido de gerações, ou até o momento em que se atinge um determinado valor de *fitness* esperado.

As funções descritas acima são os componentes principais de um GA. Outra característica que pode ser adotada dentro dos GAs é a possibilidade de se optar pelo elitismo, que consiste em garantir que os indivíduos de maior *fitness* de cada geração irão passar para a próxima. Dessa forma, é possível garantir que pelo menos um indivíduo de maior qualidade passe por processos genéticos, o que pode melhorar o resultado final do algoritmo. O modelo, considerando o elitismo, compõe o GA utilizado nesta dissertação. Sendo assim, cada indivíduo analisado pelo algoritmo de otimização terá uma probabilidade de passar por processos naturais de seleção e por processos genéticos de cruzamento e mutação. Detalhes sobre os algoritmos utilizados serão discutidos na Seção 4 de resultados.

3.2.2 Método de Compensação Geométrica

O método de compensação geométrica aplicado a amplificadores Raman foi inicialmente proposto em [21]. Neste caso, utilizou-se uma aproximação da curva de ganho Raman feita através de retas para determinar os comprimentos de onda capazes de minimizar o *ripple* de ganho. Posterior a este trabalho, foi desenvolvido em [13] um método semelhante, onde a curva de ganho Raman passa a ser representada através de um somatório de gaussianas.

O GCT utilizado neste trabalho é baseado neste último modelo [13]. O GCT é basicamente um algoritmo de regressão não linear, cuja finalidade é encontrar uma combinação-linear das curvas de ganho Raman considerando diferentes *lasers* de bombeio, para amplificar canais em uma mesma banda larga, obtendo

ripple mínimo.

Para obter curvas de ganho Raman a partir de uma determinada combinação de *lasers* de bombeio pelo método GCT, é necessário inicialmente criar uma função que reproduza a curva de ganho Raman em função da diferença em frequência.

Conforme proposto em [13], utilizou-se a expressão

$$G_R(\delta f) = \sum_{i=1}^m a_i \exp - \left[\frac{(\delta f + f_i)}{\Delta f_i} \right], \quad (3.11)$$

onde a_i , f_i e Δf_i representam, respectivamente a amplitude normalizada, a frequência central e a largura relativa às gaussianas. Já δf representa a separação em frequência entre o *laser* de bombeio e os canais da banda a ser amplificada. Este valor é negativo porque seu cálculo é feito baseado na diferença de frequência entre os bombeios e sinais.

Obtém-se, portanto, uma aproximação da curva de ganho Raman através do somatório de 9 gaussianas, cujos parâmetros estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros das gaussianas para aproximação da curva de ganho Raman.

| CURVA i | AMPLITUDE a_i | FREQUÊNCIA CENTRAL $f_i(\text{THz})$ | LARGURA DA GAUSSIANA $\Delta f_i (\text{THz})$ |
|--------------|--------------------|---|---|
| 1 | 0,0298 | 37,8451 | 3,2872 |
| 2 | 0,0558 | 32,8166 | 9,0748 |
| 3 | 0,1540 | 25,0795 | 6,6566 |
| 4 | 0,1622 | 19,3809 | 2,8433 |
| 5 | 0,4770 | 15,5191 | 0,9574 |
| 6 | 0,2348 | 13,7846 | 1,6889 |
| 7 | 0,8746 | 11,9934 | 17,1340 |
| 8 | 0,2217 | 5,6423 | 7,3076 |
| 9 | 0,1214 | 2,8097 | 3,7197 |

Com o objetivo de minimizar o *ripple*, o que significa obter uma banda plana para a amplificação dos canais, é necessário utilizar um grande número de bombeios. O que o GCT faz é definir os comprimentos de onda que serviriam

como base para uma boa solução, representada por valores baixos de *ripple*. O método utiliza a soma dos valores obtidos pela Equação (3.11) para cada um dos *lasers* de bombeio na banda de amplificação considerada. Sendo assim, a curva de ganho para o amplificador Raman, $G_{DRA}(f)$, é obtida através da seguinte expressão:

$$G_{DRA}(f) = \sum_{j=1}^n A_j G_R(f - f_j^p), \quad (3.12)$$

onde f é a frequência dos sinais, A_j e f_j^p são, respectivamente, a amplitude relacionada à integral de potência dos bombeios, representado por valores entre 0 e 1, e a frequência do j *laser* de bombeio. Na somatória, n representa o número de *lasers* de bombeio utilizados. Este valor, juntamente com a largura de banda de amplificação, deve ser entregue como parâmetro de entrada para as rotinas de cálculo.

A partir das Equações (3.11) e (3.12), pode-se definir um valor aproximado da curva de ganho. Porém, como este resultado é obtido meramente através de somatórias, os efeitos não-lineares relativos ao amplificador Raman não são computados. Dessa forma, os valores definidos pelo GCT não representam valores precisos da melhor posição para minimizar o *ripple*, mas valores que estariam mais próximos de regiões de interesse, representado no espaço de soluções pelas regiões de *fitness* máximo local ou até mesmo global.

A forma de minimizar o *ripple* se dá através de um método de mínimos quadrados. Este tipo de problema tem por objetivo encontrar o melhor ajuste para determinado conjunto de dados, sendo descrito da seguinte forma:

Considere $x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$, dada uma função vetorial $f : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^m$ com $m \geq n$, queremos minimizar $\| f(x) \|$, ou de modo equivalente, encontrar $x^* =$ *mínimo local para $F(x)$* , onde

$$F(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (f_i(x))^2 = \frac{1}{2} \|f(x)\|^2 = \frac{1}{2} f(x)^T f(x).$$

A partir de uma função $f(x, t)$ que reproduza o comportamento do ganho Raman, como a descrita em (3.12), busca-se um conjunto de parâmetros (x) que permitirá o menor erro possível no modelo para dados experimentais ou valores desejados y encontrados no instante t . Sendo assim, pode-se assumir que:

$$y_i = f(x^+, t_i) + \varepsilon_i, \quad (3.13)$$

onde ε_i correspondem aos erros encontrados para cada valor de x . A idéia principal é a de encontrar o vetor x^* que minimizaria o erro gerado por $f(x, t)$. No caso do método aqui descrito, a Equação (3.12) é função modeladora, enquanto A_j e f_j^p são os parâmetros de entrada a serem otimizados para minimizar a diferença ($F(f) = 1 - G_{DRA}(f)$).

Na referência [13], é utilizado o método de *Levenberg-Marquardt* [22] para resolver o problema de mínimos quadrados não-lineares, que funciona como uma melhoria do método de *Newton-Raphson* [23]. A Equação (3.13) pode ser expandida em séries de Taylor de forma a se obter:

$$f(t_i)_{j+1} = f(t_i)_j + \frac{\delta f(t_i)_j}{\delta x_0} \Delta x_0 + \frac{\delta f(t_i)_j}{\delta x_1} \Delta x_1, \quad (3.14)$$

onde j é o chute inicial, $j + 1$ o valor previsto, $\Delta a_0 = a_{0,j+1} - a_{0,j}$ e $\Delta a_1 = a_{1,j+1} - a_{1,j}$. Desta forma, o modelo inicial foi linearizado a partir dos seus respectivos parâmetros. A Equação (3.14) pode, então, ser substituída em (3.13):

$$y_i - f(t_i)_j = \frac{\delta f(t_i)_j}{\delta x_0} \Delta x_0 + \frac{\delta f(t_i)_j}{\delta x_1} \Delta x_1 + \varepsilon_i. \quad (3.15)$$

A Equação (3.15) pode ser representada de forma matricial $[D] = [Z_j][\Delta A] + [E]$, o que formaria uma matriz de derivadas parciais da função avaliada no momento do chute inicial j ,

$$[Z_j] = \begin{bmatrix} \delta f_1/\delta x_0 & \delta f_1/\delta x_1 \\ \delta f_2/\delta x_0 & \delta f_2/\delta x_1 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \delta f_n/\delta x_0 & \delta f_n/\delta x_1 \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

Aplicando a teoria de mínimos quadrados linear, é possível realizar uma aproximação dos valores esperados com os obtidos pela modelagem, até o momento em que se atinja um determinado critério de parada. O método de *Newton-Raphson* descrito acima, aproxima os valores de f em uma vizinhança de x . Devido a isso, a convergência do método tende a ser comprometida.

O método de *Levenberg-Marquardt* acrescenta um parâmetro de *damping* a ser somada à matriz Hessiana, responsável por determinar os passos a cada iteração. Isso faz com que a análise da Hessiana seja facilitada, conferindo uma confiabilidade maior ao código. Outra vantagem é a de que o passo dado pelo método de *Levenberg-Marquardt* permite que, mesmo com parâmetros de entrada distantes de x^* , a convergência seja obtida.

Neste trabalho, é utilizado o método de *TRUST-REGION* [22] para solucionar o problema. Tal método conta também com o fator de *damping* o que permite uma robustez maior para solucionar a questão de mínimos quadrados, porém, permite também que a região de busca seja delimitada previamente.

Diversos casos são gerados aleatoriamente com os comprimentos de onda dos bombeios e suas respectivas amplitudes. Esses parâmetros passam pelo processo descrito acima, para que seja minimizada a função $F(f) = 1 - G_{DRA}(f)$, que é a função erro, conforme ilustrado na Fig. 11. Ao final do processo, os valores encontrados para os comprimentos de onda dos *lasers* de bombeio servem como parâmetro de entrada para gerar parte da população inicial do HGA.

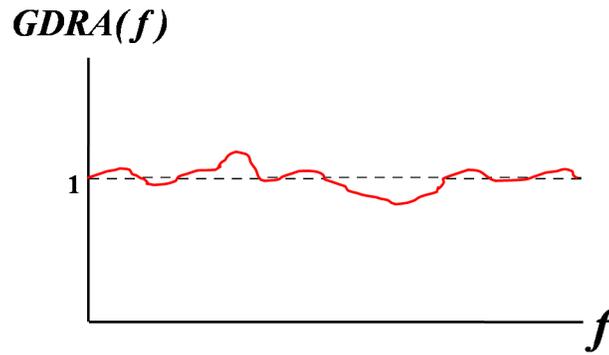


Figura 11: Função erro para o Método de Compensação Geométrica.

3.2.3 Algoritmo Genético Híbrido

O algoritmo genético híbrido aqui proposto utiliza o GCT para refinar a criação da população inicial e os métodos do GA para realizar a busca pelo espaço de soluções. A idéia principal do código é a de encontrar o menor número de bombeios capaz de atender a pré-requisitos de ganho *on-off* máximo e *ripple* mínimo a serem estipulados pelo projetista, para a banda de amplificação de sinais desejada.

Conforme ilustrado na Figura 12, o algoritmo inicia as buscas com dois *lasers* de bombeio para a faixa de sinais especificada.

Para isso, é delimitada uma região onde os *lasers* de bombeio poderão ser alocados, que é definida como 130 nm a 20nm abaixo do primeiro sinal da banda de amplificação desejada. Ou seja, caso a banda de amplificação tenha início no começo da banda C, onde o primeiro sinal estaria posicionado em 1530 nm, a região onde os *lasers* de bombeio poderão ser posicionados fica limitada entre 1400 nm e 1510 nm. Esses valores são escolhidos para garantir que os bombeios que amplificariam o início da banda estariam suficientemente distantes para obter o máximo de amplificação, o que ocorre a aproximadamente 106 nm. A distância de 20 nm garante que os últimos *lasers* de bombeio não estariam perto demais dos primeiros sinais para que os efeitos não lineares provocados sejam excessivos.

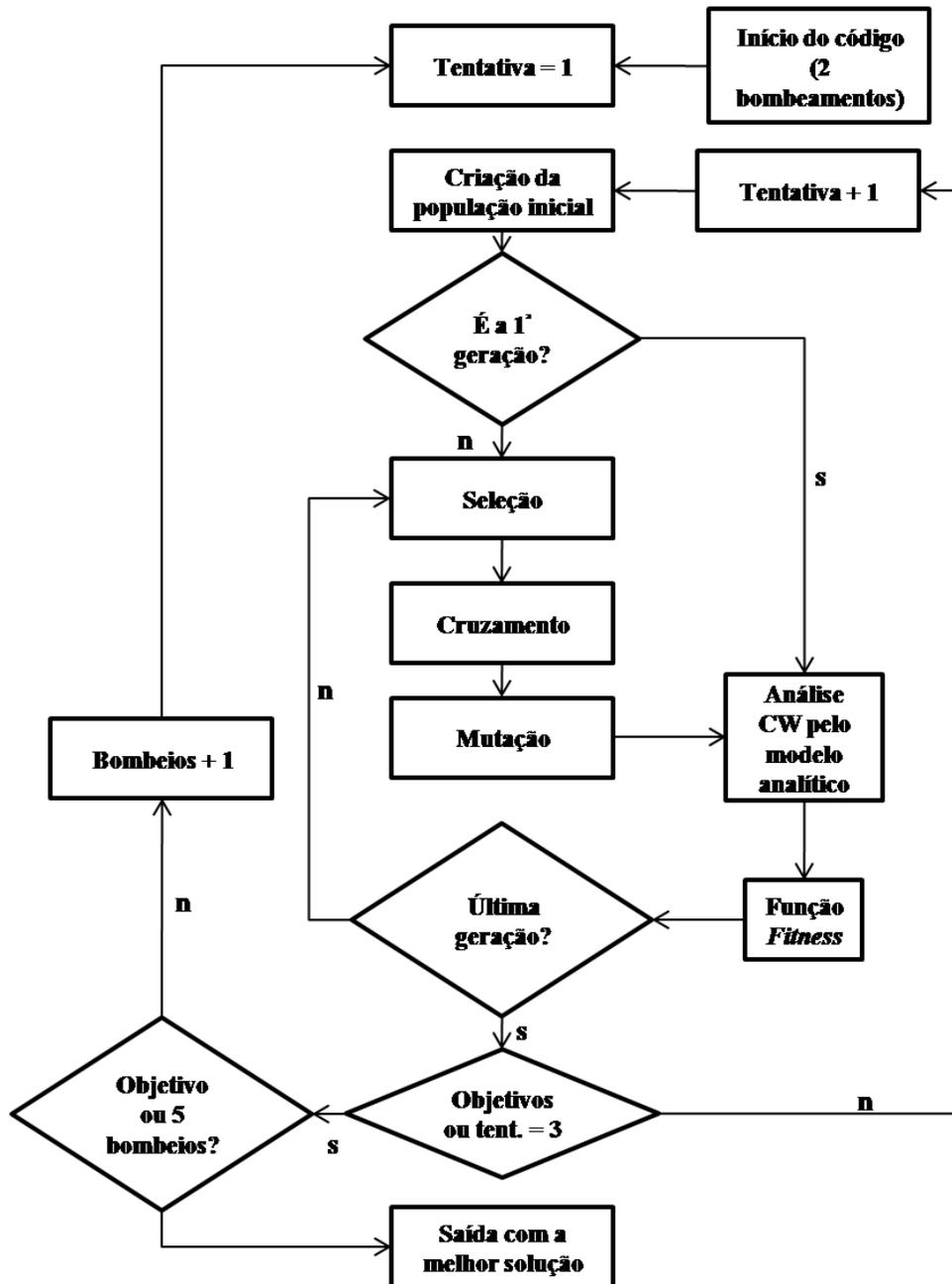


Figura 12: Fluxograma do HGA aplicado ao projeto de amplificadores Raman.

Dentro dessas delimitações, o GCT é então rodado de forma a obter os comprimentos de onda para os N lasers de bombeio, que garantam respostas com baixo valor de *ripple*. A partir dessas restrições, uma parcela da população é gerada em torno destes comprimentos de onda, enquanto o restante é gerado em todo o domínio pré-estabelecido, de forma a garantir a heterogeneidade do algoritmo. Se uma população permanece totalmente concentrada em uma única área, esta acaba comprometendo a qualidade dos processos genéticos.

Sendo assim, após a criação da família inicial, que é uma das contribuições realizadas neste trabalho, os indivíduos criados passam por processos de seleção, cruzamento e mutação, onde as probabilidades dos dois últimos são, respectivamente, 70% e 8,33%. Os processos genéticos são repetidos até que um indivíduo que atenda aos parâmetros de projeto inicial seja encontrado, ou a população chegue à centésima geração. Nesse caso, a população é descartada e o código é rodado novamente com o mesmo número de *lasers* de bombeio.

Esse processo se repete três vezes. Isso se dá pelo fato de que, ao rodar um mínimo de três vezes, garante-se que o algoritmo terá pelo menos uma resposta mediana, uma vez que a aleatoriedade da geração inicial pode fazer com que os indivíduos iniciais apresentem valores de *fitness* muito ruins.

A partir do momento em que já foram rodados três casos com um determinado número de *lasers* de bombeio sem sucesso, o número de *lasers* é então incrementado em um e o processo é reiniciado. Esse processo final é repetido até o momento em que uma resposta aceitável para os parâmetros de projeto é encontrada, ou então que o número de bombeios ultrapasse o valor máximo de cinco. A razão da escolha deste número se deve ao custo unitário de um *laser* de bombeio Raman ser extremamente alto, podendo chegar a dez vezes o valor de um *laser* de bombeio utilizado em EDFAs. Dessa forma, a rotina de otimização garante que a solução encontrada estará não só atendendo aos requisitos de projeto, como também será economicamente viável.

4 *Resultados*

Apresenta-se a seguir os resultados e discussões referentes à otimização dos amplificadores Raman.

4.1 *Introdução*

A importância do estudo e da otimização de amplificadores Raman multi-bombeios, se dá pelo fato de que, pequenas variações no comprimento de onda de bombeio, ou até mesmo de sua potência, pode levar a grandes variações no *ripple* do sistema. Essa questão fica claramente ilustrada na Figura 13.

Na Figura 13, o Caso 1 considera uma configuração com 5 *lasers* de bombeio, cujos valores de comprimento de onda e potência são, respectivamente, 1412,5 nm, 1436,9 nm, 1454,0 nm, 1470,0 nm 1505,6 nm, cada um com as potências de 230,0 mW, 158,6 mW, 179,6 mW, 91,6 mW e 187,5 mW. Com essa configuração, foi possível obter um ganho *on-off* médio superior a 8 dB e um *ripple* abaixo de 1 dB.

Para o Caso 2, os mesmos 5 *lasers* de bombeio do Caso 1 são considerados com a única modificação sendo o deslocamento do último bombeamento em 10 nm para cima, levando-o de 1505,6 nm para 1515,6 nm. As potências e os outros comprimentos de onda foram mantidos. Como pode ser observado na Figura 13, a pequena variação de apenas um parâmetro de um dos *lasers* de bombeio causa uma mudança significativos valores de ganho *on-off*, e no

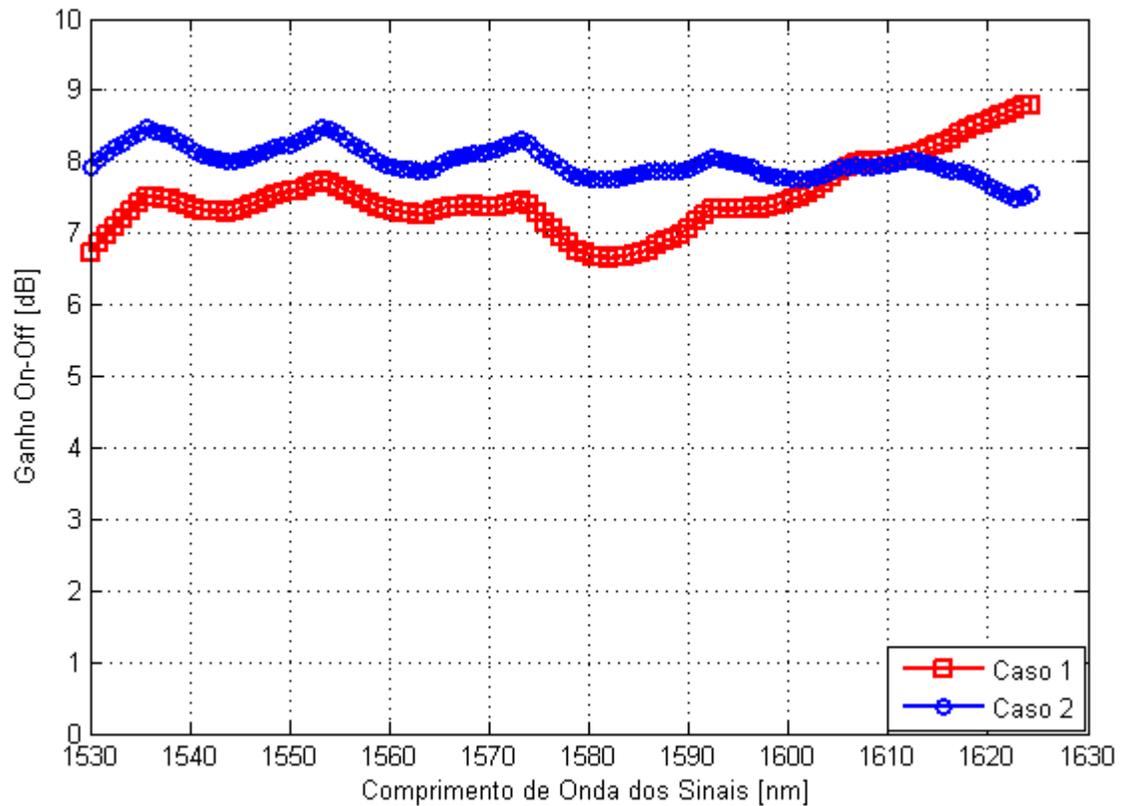


Figura 13: Curvas de Ganho *On-Off* para dois amplificadores distintos.

novo *ripple* que apresenta valores superiores a 2 dB.

Sendo assim, fica clara a necessidade de otimizar os parâmetros dos amplificadores Raman, e este capítulo irá descrever os parâmetros básicos utilizados nos algoritmos de otimização aplicados ao problema, assim como os resultados obtidos com esses dados.

Apresenta-se na Seção 4.2 a configuração considerada na análise do amplificador Raman multi-bombeio. Os parâmetros considerados na otimização do amplificador Raman são apresentados na Seção 4.3. A apresentação e posterior análise dos resultados será feita em duas etapas na Seção 4.4. Inicialmente, há a comparação entre um algoritmo GA e um GA híbrido, baseado na utilização do GCT, para verificar se o método de compensação geométrica realmente possibilita um refinamento da busca. Isto permite a obtenção de soluções com maior

ganho em menor tempo de processamento. Posteriormente, é feita a otimização através do algoritmo HGA apresentado na Seção 3.2.3, que realiza a busca por amplificadores que atendam a pré-requisitos de projeto, de forma a definir a solução com o menor número possível de *lasers* de bombeio.

4.2 Configuração do Amplificador

Os resultados aqui apresentados consideram amplificadores Raman distribuídos com múltiplos *lasers* de bombeio, no esquema de bombeamento contra-propagante e utilizando fibras SMF, conforme descrito no Capítulo 2. Deseja-se obter amplificadores capazes de atender aos requisitos de ganho *on-off* máximo e o *ripple* menor que 1 dB definidos pelo projetista, utilizando o menor número possível de *lasers* de bombeio.

Outro fator importante para o projeto é que se realizou somente análises CW, o que significa que não foram feitos estudos de análise de sinais com modulação. Portanto, os resultados não apresentam efeitos de dispersão ou análise de qualidade de recepção dos sinais para os resultados obtidos. O interesse maior deste estudo foi encontrar resultados que atendessem a especificações de ganho com *ripple* abaixo de 1 dB.

A escolha pelo esquema de bombeamento contra-propagante é devido ao fato da amplificação efetiva neste tipo de amplificadores ocorrer no final do enlace, após o sinal já ter sofrido alguma atenuação ao longo do mesmo. Com isso, o sinal não atinge valores muito altos, evitando as regiões de não-linearidade. Outro fator considerado foi o fator de polarização igual a 2, o que significa que os *lasers* de bombeio seriam despolarizados. Caso o estado de polarização dos *lasers* de bombeio fosse mantido ao longo de todo o enlace, poderia ser considerado um fator igual a 1, o que possibilitaria maiores ganhos do amplificador distribuído.

A Figura 14 ilustra o amplificador contra-propagante considerado. Pode-se observar que são utilizados diversos sinais multiplexados na entrada, no caso aqui utilizado seriam 119 sinais espaçados em 0,8 nm ao longo das bandas C e L. Os bombeamentos ficam posicionados ao final do enlace após a fibra SMF. A Tabela 3 contém os valores para os principais parâmetros de fibra utilizados em todos os testes e análises apresentados a seguir.

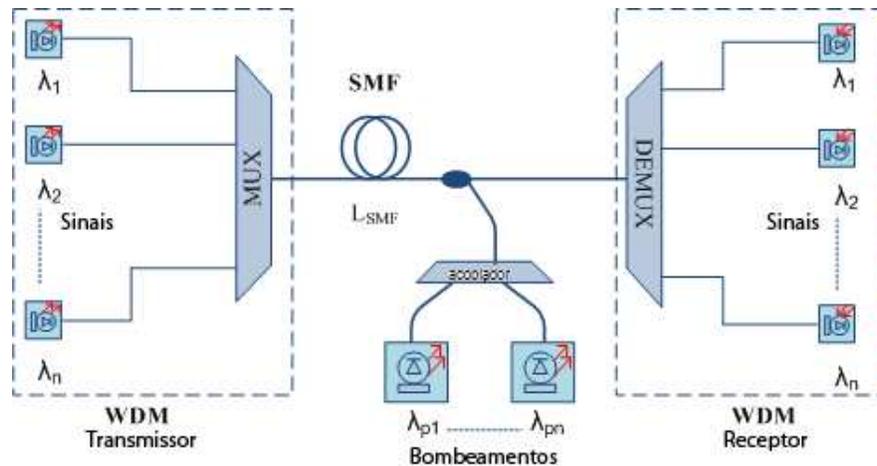


Figura 14: Configuração do amplificador distribuído contendo fibra SMF em esquema de bombeio contra-propagante.

Tabela 3: Parâmetros do sistema com fibra SMF.

| | Dados para a fibra SMF |
|---|------------------------|
| L_{SMF} (km) | 100 |
| Eficiência de ganho Raman de Pico ($W^{-1}km^{-1}$) | 0,4277 |
| A_{eff} (em 1500nm) (μm^2) | 76,30 |
| Fator de Polarização Γ | 2 |

4.3 Otimização do Amplificador

Os principais parâmetros utilizados nos algoritmos de otimização são apresentados na Tabela 4, que também incluem os parâmetros mais relevantes para

o funcionamento de um GA, tais como os fatores limitadores de potência utilizado.

Tabela 4: Parâmetros do amplificador Raman utilizados pelos algoritmos de otimização.

| Grandeza | Dados para a otimização |
|---|-------------------------|
| População | 200 indivíduos |
| Gerações | 100 gerações |
| Potência Máxima Total | 1,5 W |
| Potência Máxima por <i>laser</i> de bombeio | 0,5 W |
| Probabilidade de Cruzamento | 70 % |
| Probabilidade de Mutação | 8,3 % |

Conforme a Tabela 4, os limitadores de potência máxima equivalem a 1,5 W para o somatório de potência de todos os *lasers* de bombeio considerados em um determinado amplificador e de 0,5 W para um bombeamento individual. Os valores de 70 % e 8,3 %, foram baseados no estudo realizado em [24]

Essas limitações impostas têm um significado importante que é o de, no caso da limitação para potência individual, manter os bombeamentos dentro de especificações existentes no mercado para *lasers* de bombeio comerciais e que possam ser realmente utilizados em enlaces reais.

Já a limitação de potência total é diretamente ligado à potência máxima aplicada dentro da fibra e à alta potência de alimentação necessária para que os *lasers* funcionem. Para uma potência muito elevada, o sistema requer uma corrente muito alta para o seu funcionamento e um sistema de resfriamento muito eficiente para que se tenha confiabilidade do sistema. Devido a isso, a utilização de sistemas considerando amplificadores distribuídos com potência total acima de 1,5 W acaba por representar grandes dificuldades técnicas e, sendo assim, decidiu-se por impor esta restrição. Outro fator importante para se limitar a potência a 1,5 W é para que se evite que o sistema entre em saturação.

4.4 Análise do Amplificador Otimizado com o GA Híbrido

Descreve-se a seguir os resultados obtidos com um GA híbrido, que utiliza GCT, e para o HGA apresentado na Seção 3. Escolheu-se a configuração de amplificador distribuído com bombeios contra-propagante, em um enlace de 100 km em fibra monomodo padrão, com sinais aplicados nas bandas C e L. Um fator limitante é o valor máximo de potência que pode ser utilizado nos *lasers* de bombeio. Para evitar que o amplificador chegue à região de saturação, o que faz com que o modelo analítico utilizado apresente respostas com baixa concordância com os resultados de modelos numéricos [17], a potência total máxima a ser aplicada é limitada a 1,5 W. Do ponto de vista prático, esta restrição é conveniente já que *lasers* de alta potência acabam aumentando o custo do amplificador. Sendo assim, apesar do limite total de potência, cada *laser* também tem a limitação de 500 mW de potência máxima individual.

Para as configurações relativas ao algoritmo genético, são definidos 200 indivíduos por geração, com probabilidade de cruzamento e mutação de 70% e 8,3%, respectivamente. Esses valores são definidos baseado em um estudo realizado previamente em [24], e foram escolhidos por apresentarem os melhores resultados para a otimização de amplificadores Raman.

Inicialmente, verificou-se a melhor forma de se introduzir o GCT. Ou seja, definiu-se a proporção da população inicial a ser gerada a partir do método de compensação geométrica. Em seguida, verificou-se a convergência do GA para um sistema com 5 *lasers* de bombeio e 100 gerações.

A Tabela 5 apresenta os valores obtidos em 100 gerações para um GA cuja população inicial é gerada através de um método totalmente aleatório ou com alguma porcentagem baseado em compensação geométrica.

Os indivíduos gerados aleatoriamente, podem estar entre 130 nm a 20 nm abaixo do primeiro comprimento de onda de sinal, o que no caso do primeiro

Tabela 5: Proporção da população inicial baseada na técnica de compensação geométrica

| CASOS | SEM GCT | | 25% GCT | | 50% GCT | | 75% GCT | | 100% GCT | |
|-------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|----------|--------|
| | Ganho | Ripple | Ganho | Ripple | Ganho | Ripple | Ganho | Ripple | Ganho | Ripple |
| 1 | 5,1220 | 0,9985 | 6,3152 | 0,9701 | 7,8018 | 1,1406 | 8,1559 | 1,0494 | 7,6830 | 0,9985 |
| 2 | 5,7524 | 1,1425 | 9,4581 | 0,9994 | 8,0399 | 1,1679 | 8,0850 | 0,9657 | 6,9375 | 0,9961 |
| 3 | 6,3040 | 1,0169 | 9,4368 | 0,9408 | 5,5068 | 0,9157 | 6,2637 | 0,9911 | 8,4755 | 1,0561 |
| 4 | 8,3424 | 1,0974 | 7,3444 | 1,0682 | 5,9639 | 0,9980 | 5,9333 | 0,9666 | 7,4707 | 0,9948 |
| 5 | 6,2166 | 0,9713 | 7,3397 | 1,0891 | 7,7742 | 0,9741 | 7,7174 | 0,9049 | 11,574 | 1,1164 |
| MÉDIA | 6,3475 | 1,0453 | 7,9788 | 1,0135 | 7,0173 | 1,0393 | 7,2311 | 0,9755 | 8,4283 | 1,0324 |

sinal estar localizado no início da banda C, em 1530 nm, a faixa de busca para os *lasers* de bombeio ficaria entre 1400 nm e 1510 nm. Para os indivíduos gerados por GCT, o método irá definir um comprimento de onda para cada bombeamento e, então, um indivíduo é criado dentro de um limite de mais ou menos 10 nm deste comprimento de onda.

Como pode ser observado na Tabela 5, as melhores respostas ocorrem em 25% de GCT, uma vez que é neste percentual que se obteve o maior ganho *on-off* se comparado às outras porcentagens e o *ripple* mais próximo de 1 dB. Aumentando o percentual de indivíduos gerados a partir do método de compensação geométrica, o *ripple* tende a diminuir, devido este método ter como principal função justamente encontrar os comprimentos de onda de bombeamento que garantirão um *ripple* menor do que 1dB. Embora o *ripple* menor seja desejável, um efeito negativo é que a diversidade da população diminui, o que pode fazer com que as soluções percam qualidade.

Dessa forma, os estudos realizados e os resultados apresentados a seguir são baseados em um GA que utiliza 25% da população inicial gerada com o uso do GCT e o restante é gerada de forma aleatória. Para garantir que o número de 100 gerações escolhido para cada análise do algoritmo híbrido fosse suficiente para gerar uma boa solução, a convergência do código foi sempre verificada. A Figura 15 mostra a convergência em 100 gerações para 5 *lasers* de bombeio

utilizados.

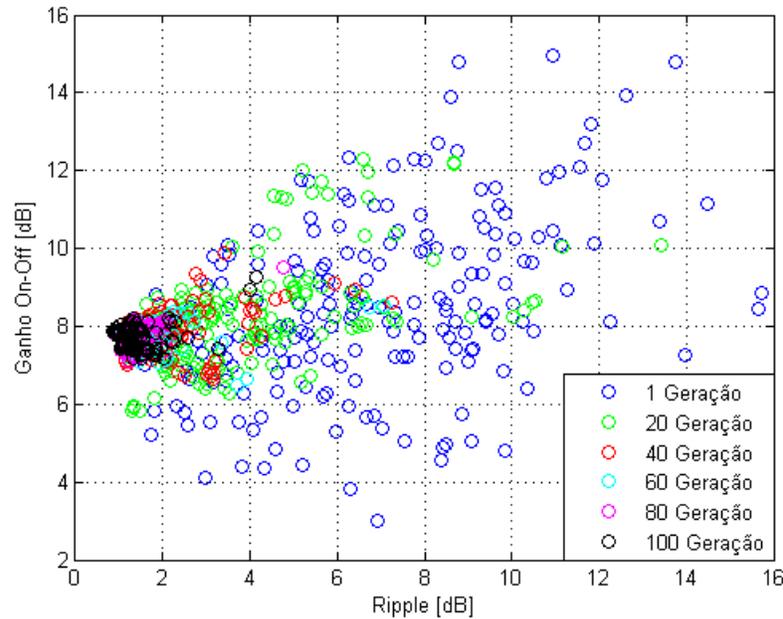


Figura 15: Convergência do algoritmo híbrido com 5 bombeamentos.

Conforme a Figura 15, em aproximadamente 40 gerações já se observa que a maioria dos 200 indivíduos está localizado na região próxima de 7 dB de ganho e apresentando 2 dB de *ripple*. Isso mostra que, em menos da metade do total de gerações, os indivíduos já chegam às regiões de interesse, com alto ganho e baixo *ripple*. O valor de 100 gerações serve para que os indivíduos, já na região de interesse, consigam interagir entre si através de cruzamentos e mutações para conseguir refinar a solução final. Por outro lado, isso pode representar um ponto negativo, uma vez que ilustra que o algoritmo se concentra em uma única região, podendo significar uma perda de diversidade.

O próximo passo é conferir a relação entre ganho *on-off* e número de *lasers* de bombeio. Através desse estudo, é possível verificar qual o número de *lasers* de bombeio terá a maior probabilidade de atender às especificações do sistema. Essa relação entre ganho e bombeamento é mostrado na Figura 16.

A Figura 16 ilustra a relação entre ganho e número de *lasers* de bombeio para enlaces de 100 km de fibra monomodo padrão. Considera-se canais na

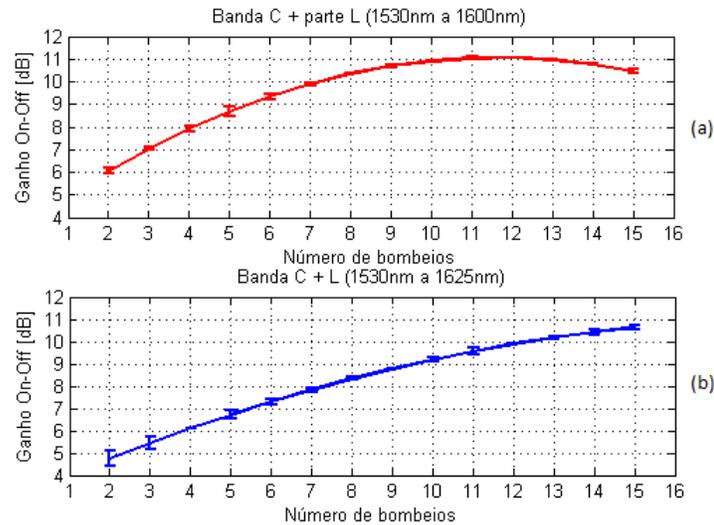


Figura 16: Variação do ganho *On-Off* em função do número de *lasers* de bombeio para canais na (a) banda C e (b) banda C+L.

banda C e parte da banda L (1530 nm a 1600 nm), para o primeiro caso (Figura 16 (a)), e um segundo caso em que o amplificador distribuído atende toda a banda C e L (Figura 16 (b)). Vale ressaltar que esses valores de ganho são obtidos para casos onde o *ripple* é obrigatoriamente menor que 1 dB.

As curvas observadas na Figura 16 são definidas através de interpolações lineares entre os resultados obtidos para cada número de *lasers* de bombeio, onde as barras representam o erro relativo a cada caso. O erro é devido à interpolação feita para se obter a curva, não sendo relacionado ao *ripple*.

Após esta análise (Figuras 16 e 15), foi gerada uma comparação mais aprofundada entre um GA puro, com população inicial aleatória e um GA híbrido com 25% da população inicial definida através do método GCT. Para isso, foram realizados testes com números diferentes de *lasers* de bombeio, considerando 100 gerações e 200 indivíduos. A Tabela 6 mostra os resultados para 2, 3, 4 e 5 *lasers* de bombeio. O número máximo de *lasers* de bombeio foi estabelecido como 5 pelo fato de que, como previamente dito, um número maior de *lasers* de bombeio acarretaria em um custo muito alto de produção dos amplificadores Raman.

Tabela 6: Comparação de ganho entre o algoritmo GA padrão e GA com GCT.

| Número de Bombeios | GA padrão | | GA com GCT | |
|--------------------|-----------|---------------|------------|---------------|
| | Ganho | <i>Ripple</i> | Ganho | <i>Ripple</i> |
| 2 | 3,26 | 1,00 | 3,92 | 1,00 |
| 3 | 4,03 | 1,00 | 4,77 | 0,97 |
| 4 | 6,95 | 0,99 | 7,58 | 1,00 |
| 5 | 7,89 | 0,97 | 9,58 | 0,99 |

Como pode ser observado na Tabela 6, para todos os casos propostos, o resultado do HGA superou aqueles obtidos com o GA. Isso está de acordo com os resultados apresentados na Tabela 5. Contudo, agora podemos perceber que o resultado antes comprovado para 5 *lasers* de bombeio, se repete para todas as variações de números de bombeamentos possíveis a ser aplicado no HGA. Dessa forma, podemos garantir que este resultado foi obtido independente dos valores de ganho especificados.

Por fim, obteve-se a configuração do ganho *on-off* em função dos comprimentos de onda dos canais de entrada para algumas das configurações já apresentadas. Dessa forma, fica possível visualizar a variação do ganho e verificar que os resultados obtidos realmente apresentam pequena variação para cada comprimento de onda de sinal. Isso é de extrema importância para que a recepção dos sinais transmitidos seja feita sem maiores dificuldades. O ganho *on-off* obtido para 2 e 4 *lasers* de bombeio é ilustrado na Figura 17.

Como já mencionado anteriormente, a utilização do método de compensação geométrica para determinar uma parcela da população inicial é uma ferramenta que permite melhorar os resultados de ganho e *ripple* para algoritmos genéticos de otimização, partindo do princípio de que o número de *lasers* de bombeio a ser otimizado já está pré-determinado. Contudo, a idéia principal foi aplicar esses mesmo princípios de forma a criar um algoritmo que, partindo de um valor de ganho e *ripple* desejados pelo projetista, retornasse o menor número de *lasers* de bombeio necessário para atender às metas propostas.

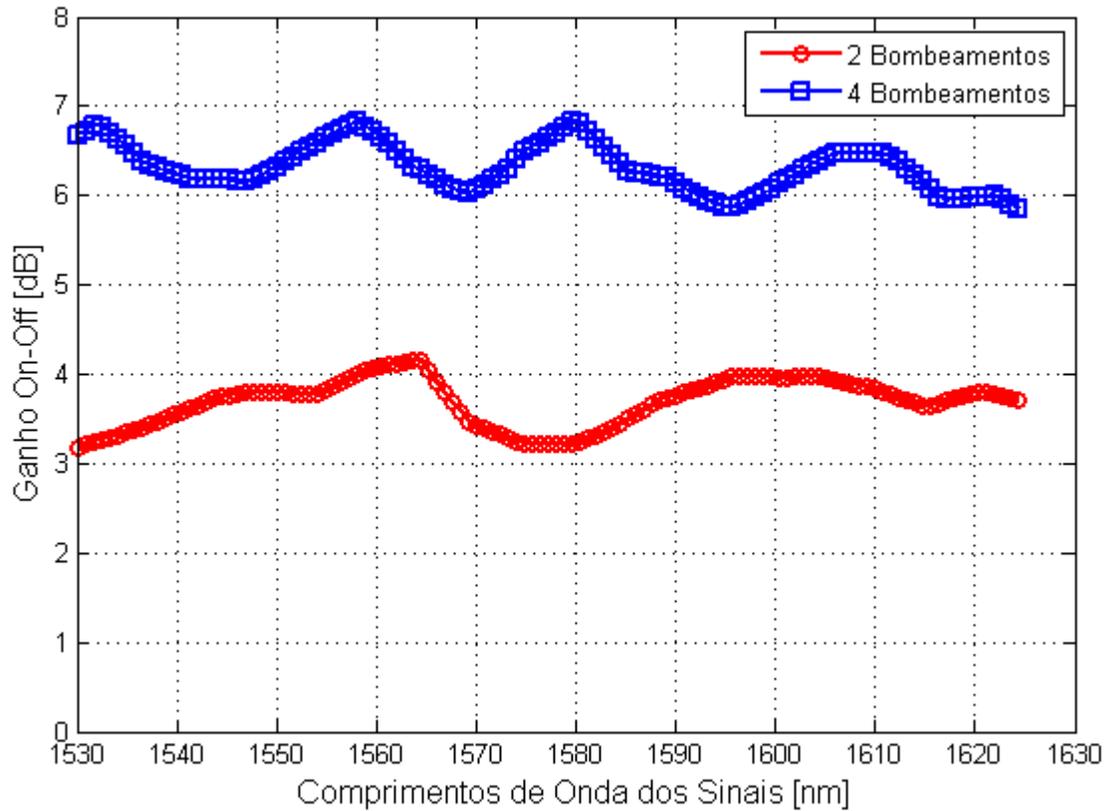


Figura 17: Ganho *On-Off* obtido para amplificadores com 2 e 4 *lasers* de bombeio para HGA.

Partindo deste pressuposto, foram realizados alguns testes com o HGA apresentado na Seção do capítulo 3.2.2. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos a partir deste estudo, onde é feita uma comparação dos valores obtidos com um algoritmo de busca baseado somente em um GA puro, e com o algoritmo HGA, que utiliza a ferramenta GCT. Na Tabela 7, para todos os casos, foi considerado um *ripple* máximo de 1 dB.

Tabela 7: Comparação entre um algoritmo GA e HGA (tempo em segundos).

| Ganho Esperado (dB) | GA | | | HGA | | |
|---------------------|----------|------------|-----------|----------|------------|-----------|
| | Bombeios | Ganho (dB) | Tempo (s) | Bombeios | Ganho (dB) | Tempo (s) |
| 2 | 2 | 2,06 | 4,65 | 2 | 2,78 | 32,40 |
| 4 | 2 | 4,03 | 991,32 | 2 | 4,08 | 563,09 |
| 6 | 5 | 6,36 | 6808,86 | 4 | 6,61 | 3964,80 |
| 8 | 5 | 8,35 | 6001,76* | 5 | 8,00 | 7174,53 |
| 9 | - | - | - | 5 | 9,75 | 8157,75 |

Como pode ser observado na Tabela 7, para ganhos baixos, o HGA apresenta

tempo de processamento maior o que significa que demora mais para encontrar a solução. Isso se deve ao fato de o GCT exigir maior tempo de processamento do que o processo totalmente aleatório utilizado no GA. Contudo, a partir de valores de 4 dB de ganho, o tempo necessário para gerar a população no HGA já é compensado pela melhoria de qualidade da população, podendo perceber que o tempo para encontrar a solução para o HGA é praticamente duas vezes menor do que para um GA padrão, apesar de ambos encontrarem soluções com o mesmo número de *lasers* de bombeio.

Contudo, uma das principais características apresentadas na Tabela 7 é com relação às respostas obtidas a partir de 6 dB de ganho. Para o caso de 6 dB, o HGA não só é capaz de encontrar uma solução de forma mais rápida, como também encontra soluções que utilizam um menor número de *lasers* de bombeio. Isto é de grande valia para um projetista, uma vez que a redução do número de *lasers* de bombeio representa uma grande redução de custo total para o projeto.

Outro ponto que deve ser salientado é o tempo de processamento para o GA igual a 6001,76 s, correspondente ao ganho de 8 dB na Tabela 7, indicado com o asterisco. Isso chama a atenção para o fato desse resultado só ter sido encontrado após uma série de 3 tentativas após executar o código por completo. Isso quer dizer que é uma solução difícil de ser encontrada através de uma população iniciada de forma totalmente aleatória.

4.5 Discussão dos Resultados

Neste Capítulo, apresentou-se resultados obtidos através de um novo método de otimização baseado em um algoritmo genético cuja população inicial é gerada parcialmente através de um método de compensação geométrica. Outra característica importante do método de otimização provém do fato de ser apli-

cado um modelo analítico de solução para as configurações de amplificadores Raman.

A análise apresentada, procura demonstrar que a utilização de um método para melhorar a qualidade da população inicial serviria não somente para melhorar as soluções encontradas para algoritmos genéticos onde o número de *lasers* de bombeio é fixo, como também para sistemas onde se procura encontrar o menor número de *lasers* de bombeio capaz de atender parâmetros específicos de ganho e *ripple*. Isso foi avaliado através de comparações entre algoritmos de otimização que utilizavam somente os princípios de algoritmos genéticos, com algoritmos que combinavam os princípios de compensação geométrica e GA.

Finalmente, através das comparações realizadas, conclui-se que a metodologia proposta permite encontrar soluções para problemas complicados, como a otimização em regiões de banda larga, como as bandas C e L, de uma forma mais eficaz e possibilitando assim, uma redução de custos para o projeto.

5 *Conclusões*

Primeiramente, nesta dissertação, foram apresentados aspectos gerais relativos às características teóricas dos amplificadores Raman e seu funcionamento. Foram também apresentados os principais algoritmos utilizados na análise aqui realizada. Dentre os algoritmos descritos, estão o código analítico de modelagem dos amplificadores Raman, e os algoritmos de otimização, que se dividem em GAs, GCT e o HGA, que é composto de uma combinação de ambos os métodos anteriores, sendo modificado também em relação às buscas de solução.

Baseando-se nestes algoritmos, foram obtidos resultados de simulação onde, foi possível projetar amplificadores Raman para atuar nas bandas C e L simultaneamente, de forma a amplificar um número grande de sinais em enlaces de 100km com fibras SMF. Para realizar essas otimizações foram utilizados tanto métodos baseados em algoritmos puramente genéticos, como também em algoritmos genéticos que utilizavam o método de compensação geométrica para gerar uma parcela da população inicial. A comparação entre os resultados obtidos com ambos os métodos, indicou que a utilização do método de compensação geométrica para criar uma população inicial de melhor qualidade, proporciona uma melhoria nas buscas do algoritmo genético, permitindo que melhores soluções sejam encontradas mais rapidamente.

Em seguida, foi realizado o mesmo estudo, porém de forma a encontrar configurações que atendessem a parâmetros de projeto, algo que não é facilmente encontrado na literatura, que se baseia, majoritariamente, na otimização

os amplificadores para um número de *lasers* de bombeio fixo. Esse estudo possibilitou determinar o menor número de *lasers* de bombeio necessário para se atender certos requisitos de projeto, permitindo uma comparação entre as soluções encontradas para algoritmos híbridos e algoritmos puramente genéticos. Novamente, o algoritmo híbrido se mostrou mais robusto, sendo capaz de encontrar soluções melhores, atendendo aos requisitos de projeto, e por vezes, com um número menor de *lasers* de bombeio, e com menor tempo de processamento.

Por fim, pode-se concluir, através das comparações dos resultados obtidos, que o método proposto proporciona uma melhoria nas soluções com os métodos de otimização utilizados. Outro ponto importante é que foi possível encontrar soluções de ganhos relativamente altos e *ripple* baixos para sistemas utilizando bandas largas (C mais L), com um número de *lasers* de bombeio aceitável para um projeto real.

Como trabalhos futuros, há a possibilidade de explorar esta metodologia para otimizar amplificadores discretos compostos por fibras compensadoras de dispersão (DCF). Esse trabalho permitiria a otimização de amplificadores discretos e resultaria assim em sistemas com maior ganho e, possivelmente, incluindo a compensação de dispersão, já que a DCF estaria presente no enlace. Outra possibilidade é o estudo das soluções obtidas em modelos numéricos de amplificadores Raman, o que permitiria uma análise mais aprofundada dos efeitos não lineares presentes nos casos estudados.

Referências

- 1 MEARS, R. J. et al. Low-threshold tunable cw and q-switched fibre laser operating at $1.55\mu\text{m}$. *Electronics Letters*, LT-4, 1986.
- 2 AGRAWAL, G. *Nonlinear Fiber Optics*. San Diego: Academic Press, 2001.
- 3 BECKER, P.; OLSSON, N.; SIMPSON, J. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology*. San Diego: Academic Press, 1999.
- 4 HEADLEY, C.; AGRAWAL, G. P. *Raman amplification in fiber-optical communication systems*. New York: Academic Press, 2005.
- 5 KAO, K.; HOCKHAM, G. Dielectric-fiber surface waveguides for optical frequencies. *Optoelectronics, IEE Proceedings Journal*, v. 133, n. 3, p. 191–198, Junho 1986.
- 6 IANNONE, E. et al. *Nonlinear Optical Communication Networks*. New York: Wiley-Interscience, 1998.
- 7 AGRAWAL, G. P. *Fiber-Optic Communication Systems*. 3. ed. New York: Wiley, 2002.
- 8 KOESTER, C. J.; SNITZER, E. Amplification in a fiber laser. *Appl. Opt.*, v. 3, 1964.
- 9 STOLEN, R. H.; LEEL, C.; JAIN, R. K. Development of the stimulated raman spectrum in single-mode silica fibers. *Journal of Optical Society of America*, v. 1, n. 4, August 1984.
- 10 HOLTZ, G. C. C. *Traçado automático de envoltórias de esforços em estruturas planas utilizando um algoritmo evolucionário*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- 11 BÄCK, T. *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice*. New York: Oxford University Press, 1996.

- 12 CANI, S. P. N. *Contribuição ao modelamento analítico em amplificadores Raman*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.
- 13 LOPEZ-BARBERO, A. P. et al. Numerical routines for the optimization of pump power and wavelength in distributed raman amplifiers. *Fiber and Integrated Optics*, v. 25, n. 5, p. 347–361, October 2006.
- 14 CASTELLANI, C. E. S. *Amplificadores Raman em Fibras Microestruturadas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.
- 15 ISLAM, M. N. *Raman Amplifiers for Telecommunications I Physical Principles*. New York: Springer-Verlag, 2004.
- 16 CASTELLANI, C. E. S. et al. Análise de sistemas ópticos operando com amplificadores raman discretos com sinais wdm na banda c. In: *MOMAG 2008: XIII Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e VIII Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*. Florianópolis: [s.n.], 2008.
- 17 CANI, S. et al. An analytical approximated solution for the gain of broadband raman amplifiers with multiple counter-pumps. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, v. 27, n. 7, p. 944–951, Abril 2009.
- 18 COELLO, C.; LAMONT, G.; VELDHUIZEN, D. *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. 2. ed. New York: Springer, 2007.
- 19 COLEY, D. A. *An introduction to genetic algorithms for scientists and engineers*. London: World Scientific, 1999.
- 20 DRÉO, J. et al. *Metaheuristics for Hard Optimization Methods and Case Studies*. [S.l.]: Springer, 2006.
- 21 LI, Z. et al. Raman amplifier design using geometry compensation technique. *Optics Express*, v. 12, n. 3, p. 436–441, February 2004.
- 22 BAZARAA, M. S.; SHERALL, H. D.; SHETTY, C. M. *Nonlinear Programming Theory and Algorithms*. 2. ed. [S.l.]: Wiley, 1993.
- 23 CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. *Numerical Methods for Engineers*. 2. ed. [S.l.]: Graw Hill, 2006.
- 24 FERREIRA, G. C. M. *Análise e Otimização de Sistemas Ópticos com Amplificadores Raman*. december 2008.