

Lucas Heitzmann Gabrielli

**Fibras Ópticas com Perfis Otimizados para
Amplificadores Paramétricos**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.
Área de concentração: Telecomunicações e Telemática.

Orientador: Prof. Dr. Hugo Enrique Hernández Figueroa

Campinas, SP
2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITERTURA - BAE - UNICAMP

G114f Gabrielli, Lucas Heitzmann
Fibras ópticas com perfis otimizados para
amplificadores paramétricos / Lucas Heitzmann
Gabrielli. – Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Hugo Enrique Hernández Figueroa.
Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Amplificadores óticos. 2. Fibras óticas. 3.
Algoritmos genéticos. I. Figueroa, Hugo Enrique
Hernández. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III.
Título.

Título em Inglês: Optical fibers with optimized profiles for parametric amplifiers

Palavras-chave em Inglês: Optical amplifiers, Optical fibers, Genetic algorithms

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Vitaly Félix Rodríguez Esquerre, Aldário Chrestani Bordonalli,

Christiano José Santiago de Matos, Gustavo Fraidenraich

Data da defesa: 29/01/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

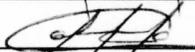
COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

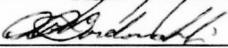
Candidato: Lucas Heitzmann Gabrielli

Data da Defesa: 29 de janeiro de 2009

Título da Tese: "Fibras Ópticas com Perfis Otimizados para Amplificadores Paramétricos"

Prof. Dr. Hugo Enrique Hernandez Figueroa (Presidente):  _____

Prof. Dr. Vitaly Félix Rodríguez Esquerre:  _____

Prof. Dr. Aldário Chrestani Bordonalli:  _____

Resumo

A proposta deste trabalho é projetar perfis de fibra óptica para uso em amplificadores paramétricos que, além de apresentarem uma banda larga, sejam também robustos em relação à fabricação. Implementamos um método eficiente de solução modal para fibras ópticas com perfis multicamadas para calcular a dispersão da fibra. Através de um algoritmo genético padrão, otimizamos os perfis para posicionar os zeros de dispersão no centro da banda de amplificação desejada e torná-los robustos a deformidades geométricas. Por fim, avaliamos o desempenho dos perfis obtidos comparando-os a perfis mais usuais na construção de amplificadores. Incluímos um modelo de flutuações nos parâmetros de fabricação das fibras para efetivamente demonstrar a evolução na robustez dos perfis otimizados. As avaliações foram feitas com base em dois métodos: o modelo de quatro ondas; e o SSFM (*Split-Step Fourier Method*), utilizado para validar o primeiro. Como resultados apresentamos: (a) perfis de fibras com propriedades otimizadas na construção de amplificadores paramétricos; e (b) dados estatísticos de nossos modelos sobre o efeito de flutuações geométricas na fabricação das fibras, e também, sobre o desempenho de amplificadores paramétricos.

Palavras-chave: fibra óptica, perfil multicamada, flutuação de dispersão, amplificador paramétrico, robustez, otimização, algoritmo genético.

Abstract

The proposal of this work is to design optical fiber profiles for parametric amplifiers both wide-band, and robust with respect to fabrication. We implement an efficient method to compute the modes of multilayered optical fibers in order to calculate the fiber dispersion. Using a standard genetic algorithm, we optimize the profiles aiming at placing the zero dispersion wavelengths at the center of the desired amplification band, and making them robust to geometrical deformations. Finally, we evaluate the performance of the designed profiles against others more commonly employed in fiber amplifiers. We include a fluctuation model in the fiber fabrication parameters to effectively demonstrate the evolution in robustness in the optimized profiles. The evaluations were conducted based in two methods: the four-wave model, and the SSFM (*Split-Step Fourier Method*), used to validate the former. As results we present: (a) fiber profiles with optimized properties for parametric amplifier construction; and (b) statistical data collected from our models about the effects of geometric fluctuations in the fabrication of the fibers and also in the performance of parametric amplifiers.

Keywords: optical fiber, multilayer profile, dispersion fluctuations, parametric amplifier, robustness, optimization, genetic algorithm.

Agradecimentos

Ao Prof. Hugo Figueroa e ao Prof. Hugo Fragnito, pela orientação, sem a qual este trabalho não existiria.

Ao colega Andres, pelas idéias e pelo trabalho disponibilizado em código aberto.

Aos colegas Gustavo, Arismar, Diego e demais colegas do laboratório, por suas críticas e sugestões.

Ao Dr. Scott Bickham, pelas produtivas discussões.

A meus pais, Orderigo e Marilena, e minha namorada, Tathi, pelo suporte e compreensão durante esta jornada.

A todos vocês, meus sinceros agradecimentos.

*"Não estamos na obra do mundo para aniquilar o que é imperfeito,
mas para completar o que se encontra inacabado."*

Emmanuel

Sumário

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xii
Glossário	xiii
1 Introdução	1
1.1 Metodologia	3
1.2 Estrutura da Dissertação	3
2 Solução da Fibra	5
2.1 Descrição da Fibra	6
2.2 Condições de Contorno	7
2.3 Equação Modal	9
2.4 Dispersão Material	10
2.5 Resultados Numéricos	11
2.5.1 Fibra Convencional	12
2.5.2 Fibra Multi-Camada	13
2.6 Conclusão	15
3 Otimização da Dispersão	16
3.1 Algoritmo Genético	17
3.1.1 Otimização de Fibras Ópticas	18
3.2 Implementação	19
3.2.1 Representação	19
3.2.2 Função de Qualidade	20
3.2.3 Sensibilidade	23
3.3 Resultados	24
3.4 Conclusão	28
4 Amplificador Paramétrico	30
4.1 Modelo de Quatro Ondas	31
4.2 Equação Não-Linear de Schrödinger	36
4.3 Modelo de Flutuações	37
4.4 Implementação	40
4.5 Resultados Numéricos	41
4.5.1 Fibras Ideais	41

4.5.2	Fibras Deformadas sem Flutuação	46
4.5.3	Modelo Completo	50
4.6	Considerações Finais	60
5	Conclusões	63
5.1	Trabalhos futuros	64
	Referências bibliográficas	65
A	Fibra com Uma Camada	67
B	Relação entre Potência, Comprimento, Banda e Ganho no FOPA	70

Lista de Figuras

2.1	Geometria da fibra com núcleo de N camadas.	6
2.2	Parâmetros normalizados para o modo fundamental de uma fibra convencional de baixo contraste de índices.	12
2.3	Perfil de índices de refração para uma fibra com 2 camadas no núcleo e componentes tangenciais normalizadas do campo elétrico calculadas em 1550 nm para o modo fundamental ($m = 1$).	14
2.4	Perfil de índices de refração para uma fibra com 3 camadas no núcleo e componentes tangenciais normalizadas do campo elétrico calculadas em 1550 nm para o modo fundamental ($m = 1$).	14
2.5	Perfil de índices de refração para uma fibra com 4 camadas no núcleo e componentes tangenciais normalizadas do campo elétrico calculadas em 1550 nm para o modo fundamental ($m = 1$).	15
3.1	Exemplos de curvas de ganho paramétrico para fibras com β_4 positivo (linha contínua) e negativo (tracejada) como previstos ao se desconsiderar dispersões de ordens mais elevadas. Bombeios nas frequências representadas pelos traços verticais.	22
3.2	Perfis de índices de refração das fibras utilizadas. Os índices, calculados em 1550 nm, estão normalizados pelo da sílica pura neste mesmo comprimento de onda.	26
3.3	Curvas de dispersão das fibras utilizadas. A área preenchida sob cada curva indica sua região de variação quando a seção transversal da fibra é deformada entre -1% e +1%.	26
3.4	Variação do zero de dispersão das fibras desenvolvidas através do algoritmo genético e da fibra de uma camada em função da deformação da fibra.	27
3.5	Variação de $\beta_4(\omega_0)$ para as fibras desenvolvidas através do algoritmo genético e para a fibra de uma camada em função da deformação da fibra.	28
3.6	Variação de $\beta_6(\omega_0)$ para as fibras desenvolvidas através do algoritmo genético e para a fibra de uma camada em função da deformação da fibra.	29
4.1	Ilustração da idéia de comprimento de relação (L_c): seções próximas de uma dada fibra são provavelmente mais semelhantes que seções separadas por uma distância maior. O comprimento de correlação traduz essa escala de distâncias.	38
4.2	Exemplos de flutuação dos diâmetros da fibra segundo o modelo adotado. Os parâmetros utilizados foram desvio padrão de 1% e comprimento de correlação 50 m para uma fibra de 150 m de comprimento.	39
4.3	Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_1 obtidos pela matriz de transferência do modelo de quatro ondas e pelo SSFM (bombeios indicados pelos traços verticais).	44

4.4	Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_2 obtidos pela matriz de transferência do modelo de quatro ondas e pelo SSFM (bombeios indicados pelos traços verticais).	44
4.5	Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_3 obtidos pela matriz de transferência do modelo de quatro ondas e pelo SSFM (bombeios indicados pelos traços verticais).	45
4.6	Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_4 obtido pela matriz de transferência do modelo de quatro ondas e pelo SSFM (bombeios indicados pelos traços verticais).	45
4.7	Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_1 original (vermelho) e com diâmetro 0,25% maior (tracejada) e 0,25% menor (traço-ponto) em toda sua extensão obtidos através do modelo de quatro ondas (bombeios indicados pelos traços verticais).	46
4.8	Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_1 original (linha contínua) e com diâmetro 1% maior (tracejada) e 1% menor (traço-ponto) em toda sua extensão obtidos através do modelo de quatro ondas (bombeios indicados pelos traços verticais).	47
4.9	Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_2 original (linha contínua) e com diâmetro 0,25% maior (tracejada) e 0,25% menor (traço-ponto) em toda sua extensão obtidos através do modelo de quatro ondas (bombeios indicados pelos traços verticais).	48
4.10	Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_2 original (linha contínua) e com diâmetro 1% maior (tracejada) e 1% menor (traço-ponto) em toda sua extensão obtidos através do modelo de quatro ondas (bombeios indicados pelos traços verticais).	48
4.11	Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_3 original (linha contínua) e com diâmetro 0,25% maior (tracejada) e 0,25% menor (traço-ponto) em toda sua extensão obtidos através do modelo de quatro ondas (bombeios indicados pelos traços verticais).	49
4.12	Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_3 original (linha contínua) e com diâmetro 1% maior (tracejada) e 1% menor (traço-ponto) em toda sua extensão obtidos através do modelo de quatro ondas (bombeios indicados pelos traços verticais).	49
4.13	Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_4 original (linha contínua) e com diâmetro 0,25% maior (tracejada) e 0,25% menor (traço-ponto) em toda sua extensão obtidos através do modelo de quatro ondas (bombeios indicados pelos traços verticais).	50
4.14	Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_4 original (linha contínua) e com diâmetro 1% maior (tracejada) e 1% menor (traço-ponto) em toda sua extensão obtidos através do modelo de quatro ondas (bombeios indicados pelos traços verticais).	51
4.15	Produto banda por ganho em função de σ_R para comprimentos de correlação de 0,1L. Os subgráficos mostram os desvios padrão das medições de cada fibra para três diferentes valores de σ_R	53
4.16	Produto banda por ganho em função de σ_R para comprimentos de correlação de 0,25L. Os subgráficos mostram os desvios padrão das medições de cada fibra para três diferentes valores de σ_R	53
4.17	Ganho paramétrico em função de σ_R para comprimentos de correlação de 0,25L. Os subgráficos mostram os desvios padrão das medições de cada fibra para três diferentes valores de σ_R	54
4.18	Banda de amplificação em função de σ_R para comprimentos de correlação de 0,25L. Os subgráficos mostram os desvios padrão das medições de cada fibra para três diferentes valores de σ_R	55
4.19	Desvio do centro da banda de amplificação dos FOPAs para as três fibras com comprimentos de correlação de 0,1L.	56
4.20	Desvio do centro da banda de amplificação dos FOPAs para as três fibras com comprimentos de correlação de 0,25L.	56

4.21	Produto largura de banda por ganho de cada fibra em função do comprimento de correlação para desvio de 1% do diâmetro. Os subgráficos mostram os desvios padrão das medições de cada fibra para três diferentes valores de L_c	57
4.22	Produto largura de banda por ganho de cada fibra em função do comprimento de correlação para desvio de 0,25% do diâmetro. Os subgráficos mostram os desvios padrão das medições de cada fibra para três diferentes valores de L_c	58
4.23	Ganho de cada fibra em função do comprimento de correlação para desvio de 1% do diâmetro (<i>ripple</i> máximo de ± 1 dB). Os subgráficos mostram os desvios padrão das medições de cada fibra para três diferentes valores de L_c	58
4.24	Ganho de cada fibra em função do comprimento de correlação para desvio de 0,25% do diâmetro (<i>ripple</i> máximo de ± 1 dB). Os subgráficos mostram os desvios padrão das medições de cada fibra para três diferentes valores de L_c	59
4.25	Largura de banda de cada fibra em função do comprimento de correlação para desvio de 1% do diâmetro (<i>ripple</i> máximo de ± 1 dB). Os subgráficos mostram os desvios padrão das medições de cada fibra para três diferentes valores de L_c	60
4.26	Largura de banda de cada fibra em função do comprimento de correlação para desvio de 0,25% do diâmetro (<i>ripple</i> máximo de ± 1 dB). Os subgráficos mostram os desvios padrão das medições de cada fibra para três diferentes valores de L_c	61
A.1	Curvas do zero de dispersão da fibra de uma camada em função da dopagem e do raio de seu núcleo.	68
A.2	Curvas da dispersão de quarta ordem no zero de dispersão da fibra de uma camada em função da dopagem e do raio de seu núcleo.	68
A.3	Curvas do coeficiente de não-linearidade da fibra de uma camada em função da dopagem e do raio de seu núcleo.	69

Lista de Tabelas

2.1	Constantes das equações de dispersão material para os dois modelos utilizados. . . .	11
3.1	Valores das constantes utilizadas na função de qualidade das fibras.	23
3.2	Principais parâmetros de cada fibra utilizada. Consideramos o zero central para \mathcal{F}_2 . .	25
4.1	Especificação dos FOPAs realizados com cada fibra sem deformação por meio do modelo de quatro ondas.	41
4.2	Correção das larguras de banda dos FOPAs pela inclusão dos efeitos de MI – equação 4.38.	42
B.1	Relação entre parâmetros e características de amplificação dos FOPAs (exemplos realizados para a fibra \mathcal{F}_4).	71

Glossário

DSF	Dispersion-Shifted Fiber
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier
FOPA	Fiber Optic Parametric Amplifier
FWM	Four Wave Mixing
HNLF	Highly Non-Linear Fiber
MI	Modulation Instability
NLSE	Non-Linear Schrödinger Equation
PCF	Photonic Crystal Fiber
PMD	Polarization Mode Dispersion
SSFM	Split-Step Fourier Method
UPM	Uncertainty Principle Method

Trabalhos Publicados Pelo Autor

1. L.H. Gabrielli, H.E. Hernández-Figueroa, H.L. Fragnito. "Otimização de Fibras Ópticas Robustas para Amplificadores Paramétricos de Alta Performance," *Anais (CD-ROM) do MOMAG 2008*, 13^o SBMO – Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 8^o CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo. Florianópolis, SC, Brasil, 7-10 de setembro, 2008.

Capítulo 1

Introdução

Redes de comunicação óptica crescem em capacidade a cada ano. Hoje, redes DWDM (multiplexação densa por divisão de comprimento de onda – *dense wavelength division multiplexing*) trabalham, por exemplo, em banda larga, compreendendo as faixas de 1530 nm a 1565 nm e de 1565 nm a 1625 nm (bandas C e L, respectivamente). Para suprir a necessidade de amplificação óptica dessas redes, utiliza-se atualmente amplificadores tipo EDFA (amplificador a fibra dopada com érbio – *erbium-doped fiber amplifier*), que apresentam ganhos planos de até aproximadamente 100 nm [1].

Por outro lado, há previsão de que, em alguns anos, uma banda ainda maior – da ordem de centenas de nanômetros – será necessária para suprir a demanda dos usuários [2]. Adicionalmente, seria vantajoso utilizar-se dispositivos que não só atuassem como amplificadores, mas também pudessem exercer outras funções, como converter as frequências dos sinais ou conjugar suas fases. Dentre as tecnologias de amplificação óptica conhecidas, somente os FOPA (amplificador paramétrico a fibra óptica – *fiber optic parametric amplifier*) têm capacidade para suprir essa demanda.

Modelos de FOPAs com um bombeio podem exibir ganhos elevados [3], embora sua banda seja mais restrita, pois o bombeio a divide em duas metades separadas por uma região central de baixos ganhos. É possível, no entanto, aumentar o perfil de ganho de cada uma dessas metades ajustando-se as características de dispersão da fibra do amplificador. Utilizando uma PCF (fibra de cristal fotônico – *photonic crystal fiber*), [4] apresenta simulações onde são obtidos ganhos de 33 dB com *ripple* (oscilação ao redor do valor principal) de 0,2 dB em uma banda de 160 nm. Numericamente já se obteve também o mesmo *ripple* em uma banda de 200 nm ao se controlar a dispersão da fibra

ao longo da mesma [5].

Resultados ainda melhores foram obtidos no caso dos FOPAs com dois bombeios, que não sofrem a mesma limitação de terem sua banda subdividida. Simplesmente considerando o emprego de uma DSF (fibra com dispersão deslocada – *dispersion-shifted fiber*) comum, 90 nm de banda com 0,2 dB de *ripple* já são previstos em [6]. Fazendo uso de duas seções de HNLF (fibra altamente não-linear – *highly non-linear fiber*) [7] demonstrou numericamente que é possível construir um FOPA com mais de 340 nm de banda e ganho de 20,3 dB com *ripple* de 0,2 dB.

Tais resultados são, no entanto, bastante otimistas comparados a dados experimentais existentes. A maior banda de amplificação de que temos notícia conseguida em laboratório foi de 115 nm com ganho de 25 dB e *ripple* de 1,5 dB. O impressionante resultado foi obtido a partir de uma HNLF com dois bombeios [8]. A marcante diferença entre resultados experimentais e previsões teóricas deve-se principalmente ao fato de que as características de dispersão das fibras ópticas apresentam grandes variações resultantes do próprio processo de fabricação da fibra [9].

A proposta deste trabalho é, utilizando um modelo mais realista para essas variações de dispersão ao longo da fibra, desenvolver um perfil que além de apresentar boas características de amplificação paramétrica, seja robusto perante esse modelo de variações. Buscamos com isso um perfil que, quando fabricado, permita resultados experimentais mais próximos das previsões numéricas feitas com base nele.

A importância dos resultados buscados neste trabalho é sua contribuição para o amadurecimento da tecnologia de amplificação paramétrica. Apesar de promissora, não há hoje amplificadores comerciais baseados nessa tecnologia para o mercado de telecomunicações. Os componentes destes dispositivos não apresentam um custo aceitável para sua introdução no mercado. Por exemplo, atualmente necessita-se de lasers sintonizáveis de alta potência para produzir-se um FOPA em laboratório. Até que requisitos como esse sejam relaxados através de novas técnicas, o custo de produção em larga escala de amplificadores paramétricos continuará impedindo sua comercialização.

1.1 Metodologia

Para tratar as variações da curva de dispersão das fibra ópticas, consideramos que elas resultam do próprio processo de fabricação da fibra, sendo geradas a partir de variações dos parâmetros construtivos do seu perfil, isto é, alterações em sua geometria ou índices de refração nominais. Limitamo-nos nesta dissertação a analisar apenas o efeito de deformidades geométricas da fibra na forma de compressões ou expansões de sua seção transversal, pois acreditamos ser este um dos tipos de deformação mais freqüentemente encontrados nas fibras devido à própria natureza do seu processo de fabricação.

Fibras ópticas são produzidas a partir de uma pré-forma cilíndrica que é aquecida e puxada em uma torre. Parâmetros como a viscosidade do material, a temperatura de aquecimento da pré-forma e a velocidade de puxamento da fibra influenciam diretamente em seu diâmetro final. Conseqüentemente, vibrações presentes no maquinário e pequenos desvios de temperatura no forno associados à velocidade de puxamento provocam variações no diâmetro da fibra ao longo de toda sua extensão.

Naturalmente as informações relevantes para produzir-se um modelo fiel deste processo para uma determinada planta de manufatura são confidenciais. Utilizamos, portanto, um modelo bastante comum e aceito na literatura, que incorpora um comprimento de correlação para controlar as variações da seção da fibra [9, 10] e adaptamo-lo à nossa abordagem. Não há, porém, muito consenso a respeito do comprimento de correlação das deformações ao longo da fibra, embora se acredite que possa variar de dezenas de metros a quilômetros segundo a velocidade de puxamento da fibra. Deixamos então esse comprimento como um parâmetro livre na avaliação dos amplificadores estudados, informação esta que poderá mais tarde ser usada como baliza no controle do eventual processo de fabricação da fibra aqui projetada.

1.2 Estrutura da Dissertação

Primeiramente implementamos um método eficiente de cálculo da constante de propagação de uma fibra de perfil degrau qualquer, que será apresentado no capítulo 2. Esse algoritmo é empregado na determinação do efeito das deformações geométricas da fibra em sua curva de dispersão.

A seguir, no capítulo 3, descrevemos o algoritmo genético utilizado para otimizar a dispersão da fibra para construção de um FOPA. Como produto deste passo do desenvolvimento, obtivemos dois perfis candidatos a originar amplificadores robustos e que foram analisados e comparados entre si.

Finalmente, após detalharmos a base teórica de funcionamento dos FOPAs de dois bombeios, mostramos no capítulo 4 os resultados obtidos com os perfis desenvolvidos. Além da fibra em si, apresentamos adicionalmente informações sobre o grau de imperfeições aceitável no processo de fabricação da mesma que permitirão a execução do amplificador proposto.

Capítulo 2

Solução da Fibra

Nosso objetivo foi estudar o desempenho dos FOPAs ao introduzirmos flutuações na curva de dispersão de sua fibra e desenvolver um perfil de fibra que seja robusto com relação a tais variações. Embora diversos estudos desse tipo já tenham sido realizados [8,10–12], propomos aqui uma abordagem inovadora.

Em geral, as flutuações na dispersão da fibra são modeladas considerando-se o comprimento de onda onde se encontra o zero de dispersão uma variável aleatória com desvios da ordem de poucos nanômetros. No entanto, acreditamos que essas flutuações decorrem principalmente do processo de fabricação da fibra, como discutido na seção 1.1, de modo que não apenas o zero de dispersão apresenta variações, mas sim toda a curva de propagação modal da fibra. Assim, utilizamos um método analítico para determinar essa curva [13] para fibras com diferentes diâmetros (escalando sua geometria), de modo a obtermos a flutuação completa do modo de propagação provocado por essas deformações.

Primeiramente apresentamos o modelo utilizado para descrever a geometria das fibras consideradas. A seguir desenvolvemos o método utilizado na solução dos modos de propagação da fibra e expomos rapidamente o modelo utilizado para a dispersão do material. Por fim, apresentamos alguns resultados numéricos do algoritmo que demonstram sua eficácia e versatilidade.

2.1 Descrição da Fibra

Consideramos em nosso universo de trabalho apenas fibras com perfis de índice tipo degrau, ou seja, formadas por tubos concêntricos de materiais com índice de refração constante. Como mostrado na figura 2.1, a geometria considerada no problema é formada por N camadas cilíndricas de materiais diferentes com eixo de simetria na direção z . Cada camada $i \in \{0, 1, \dots, N - 1\}$ possui um raio externo r_i e um índice de refração n_i . Utilizamos n_N para indicar o índice da casca externa da fibra, considerada ilimitada. Estamos supondo ainda que não utilizamos materiais magnéticos, isto é, a permeabilidade magnética de todos os materiais é igual à do vácuo μ_0 , de modo que os materiais ficam definidos por seu índice de refração n .

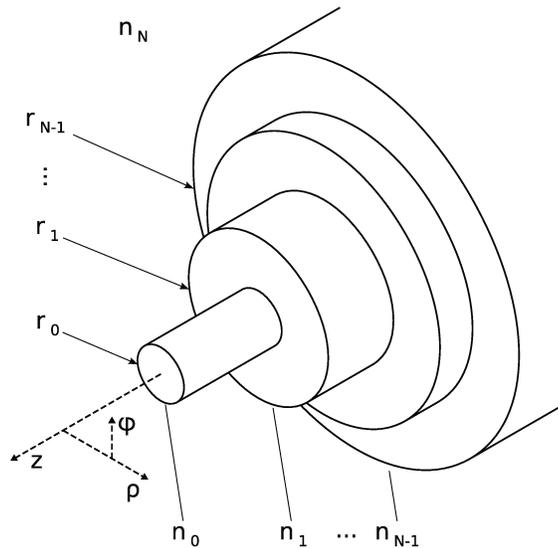


Figura 2.1: Geometria da fibra com núcleo de N camadas.

A geometria proposta nos permite flexibilidade para modelar as fibras, incluindo fibras convencionais e perfis W. A grande vantagem deste formato é a rapidez com que pode-se determinar os modos de propagação da estrutura, pois não é necessário o uso de métodos numéricos como o de elementos finitos – computacionalmente mais custosos –, já que há soluções analíticas para os campos eletromagnéticos propagantes. O trabalho computacional fica reduzido apenas à solução de uma equação transcendental para se determinar as constantes de propagação em cada frequência de interesse.

Além dessa vantagem, embora seja impossível modelar perfis mais complexos, como o triangular, ainda é possível aproximá-los “por partes” através do acréscimo de várias camadas finas na fibra.

2.2 Condições de Contorno

Observando-se a simetria do problema, escrevemos as conhecidas soluções para a equação de onda em um meio homogêneo e sem perdas em coordenadas cilíndricas [14], considerando os campos harmônicos com um comprimento de onda no espaço livre λ_0 . Como estamos interessados em avaliar as condições de contorno do problema (planos com ρ constante), precisamos apenas das componentes dos campos tangenciais a tais lugares geométricos, ou seja, apenas as componentes em z e ϕ :

$$E_z^i = [A_{1i}J_m(\alpha_{\rho i}\rho) + B_{1i}Y_m(\beta_{\rho i}\rho)] \cos(m\phi + \psi) e^{-j\beta z} \quad (2.1)$$

$$E_\phi^i = \frac{j}{\beta_{\rho i}^2} \left\{ \frac{m\beta}{\rho} [A_{1i}J_m(\beta_{\rho i}\rho) + B_{1i}Y_m(\beta_{\rho i}\rho)] + k_0\eta_0\beta_{\rho i} [A_{2i}J'_m(\beta_{\rho i}\rho) + B_{2i}Y'_m(\beta_{\rho i}\rho)] \right\} \sin(m\phi + \psi) \quad (2.2)$$

$$H_z^i = [A_{2i}J_m(\beta_{\rho i}\rho) + B_{2i}Y_m(\beta_{\rho i}\rho)] \sin(m\phi + \psi) e^{-j\beta z} \quad (2.3)$$

$$H_\phi^i = -\frac{j}{\beta_{\rho i}^2} \left\{ \frac{k_0 n_i}{\eta_0} \beta_{\rho i} [A_{1i}J'_m(\beta_{\rho i}\rho) + B_{1i}Y'_m(\beta_{\rho i}\rho)] + \frac{m\beta}{\rho} [A_{2i}J_m(\beta_{\rho i}\rho) + B_{2i}Y_m(\beta_{\rho i}\rho)] \right\} \cos(m\phi + \psi) \quad (2.4)$$

onde $i \in \{0, 1, \dots, N\}$ é o índice da camada ($i = N$ para a casca externa), E e H são os campos elétrico e magnético, respectivamente, J_m e Y_m são as funções de Bessel de primeira e segunda ordens, respectivamente, η_0 é a impedância de onda do vácuo, m a constante de simetria na direção ϕ , ψ uma constante dependente da excitação, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ o número de onda no espaço livre, β a constante de propagação do modo, n_i o índice de refração da camada i , e $\beta_{\rho i}$ tal que:

$$\beta_{\rho i}^2 = k_0^2 n_i^2 - \beta^2.$$

Sabemos ainda que em algumas camadas devemos ter soluções evanescentes, isto é, com $\beta > k_0 n_i$, de modo que, para evitar termos que trabalhar com números complexos, podemos rescrever os campos em tais casos como:

$$E_z^i = [A_{1i} I_m(\alpha_{\rho i} \rho) + B_{1i} K_m(\alpha_{\rho i} \rho)] \cos(m\phi + \psi) e^{-j\beta z} \quad (2.5)$$

$$E_\phi^i = -\frac{j}{\alpha_{\rho i}^2} \left\{ \frac{m\beta}{\rho} [A_{1i} I_m(\alpha_{\rho i} \rho) + B_{1i} K_m(\alpha_{\rho i} \rho)] + k_0 \eta_0 \alpha_{\rho i} [A_{2i} I'_m(\alpha_{\rho i} \rho) + B_{2i} K'_m(\alpha_{\rho i} \rho)] \right\} \sin(m\phi + \psi) \quad (2.6)$$

$$H_z^i = [A_{2i} I_m(\alpha_{\rho i} \rho) + B_{2i} K_m(\alpha_{\rho i} \rho)] \sin(m\phi + \psi) e^{-j\beta z} \quad (2.7)$$

$$H_\phi^i = \frac{j}{\alpha_{\rho i}^2} \left\{ \frac{k_0 n_i}{\eta_0} \alpha_{\rho i} [A_{1i} I'_m(\alpha_{\rho i} \rho) + B_{1i} K'_m(\alpha_{\rho i} \rho)] + \frac{m\beta}{\rho} [A_{2i} I_m(\alpha_{\rho i} \rho) + B_{2i} K_m(\alpha_{\rho i} \rho)] \right\} \cos(m\phi + \psi) \quad (2.8)$$

onde I_m e K_m são as funções de Bessel modificadas de primeira e segunda ordens, respectivamente, e $\alpha_{\rho i}$ é tal que:

$$\alpha_{\rho i}^2 = \beta^2 - k_0^2 n_i^2.$$

As condições de contorno do problema impõem que as componentes apresentadas sejam contínuas em todo o seu domínio, em especial nas interfaces, de modo que para obtermos as soluções do problema, devemos equacionar os campos E_z , E_ϕ , H_z e H_ϕ de todas as camadas adjacentes, isto é:

$$E_z^i(r_i) = E_z^{i+1}(r_i) \quad (2.9)$$

$$E_\phi^i(r_i) = E_\phi^{i+1}(r_i) \quad (2.10)$$

$$H_z^i(r_i) = H_z^{i+1}(r_i) \quad (2.11)$$

$$H_\phi^i(r_i) = H_\phi^{i+1}(r_i) \quad (2.12)$$

para $i \in \{0, 1, \dots, N-1\}$.

Substituindo as equações (2.1) a (2.8) em (2.9) a (2.12), obtemos um sistema de equações que pode ser resolvido para cada número de onda k_0 e deve aceitar soluções não triviais. Procuramos

então colocar estas equações em forma matricial de forma a facilitar a sua manipulação [13]. Para tanto definimos:

$$F_{0i}(\rho) = \begin{bmatrix} J_m(\beta_{\rho i}\rho) & Y_m(\beta_{\rho i}\rho) & 0 & 0 \\ \frac{m\beta}{\rho\beta_{\rho i}^2}J_m(\beta_{\rho i}\rho) & \frac{m\beta}{\rho\beta_{\rho i}^2}Y_m(\beta_{\rho i}\rho) & \frac{k_0\eta_0}{\beta_{\rho i}}J'_m(\beta_{\rho i}\rho) & \frac{k_0\eta_0}{\beta_{\rho i}}Y'_m(\beta_{\rho i}\rho) \\ \frac{k_0n_i^2}{\eta_0\beta_{\rho i}}J'_m(\beta_{\rho i}\rho) & \frac{k_0n_i^2}{\eta_0\beta_{\rho i}}Y'_m(\beta_{\rho i}\rho) & \frac{m\beta}{\rho\beta_{\rho i}^2}J_m(\beta_{\rho i}\rho) & \frac{m\beta}{\rho\beta_{\rho i}^2}Y_m(\beta_{\rho i}\rho) \\ 0 & 0 & J_m(\beta_{\rho i}\rho) & Y_m(\beta_{\rho i}\rho) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$F_{1i}(\rho) = \begin{bmatrix} I_m(\alpha_{\rho i}\rho) & K_m(\alpha_{\rho i}\rho) & 0 & 0 \\ -\frac{m\beta}{\rho\alpha_{\rho i}^2}I_m(\alpha_{\rho i}\rho) & -\frac{m\beta}{\rho\alpha_{\rho i}^2}K_m(\alpha_{\rho i}\rho) & -\frac{k_0\eta_0}{\alpha_{\rho i}}I'_m(\alpha_{\rho i}\rho) & -\frac{k_0\eta_0}{\alpha_{\rho i}}K'_m(\alpha_{\rho i}\rho) \\ -\frac{k_0n_i^2}{\eta_0\alpha_{\rho i}}I'_m(\alpha_{\rho i}\rho) & -\frac{k_0n_i^2}{\eta_0\alpha_{\rho i}}K'_m(\alpha_{\rho i}\rho) & -\frac{m\beta}{\rho\alpha_{\rho i}^2}I_m(\alpha_{\rho i}\rho) & -\frac{m\beta}{\rho\alpha_{\rho i}^2}K_m(\alpha_{\rho i}\rho) \\ 0 & 0 & I_m(\alpha_{\rho i}\rho) & K_m(\alpha_{\rho i}\rho) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$C_i = \begin{bmatrix} A_{1i} \\ B_{1i} \\ A_{2i} \\ B_{2i} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Desse modo, é fácil perceber que as condições de contorno (2.9) a (2.12) podem ser escritas de forma compacta para todas as camadas como:

$$F_{\zeta_i i}(r_i) C_i = F_{\zeta_{i+1} i+1}(r_i) C_{i+1} \quad (2.16)$$

para $i \in \{0, 1, \dots, N-1\}$, e $\zeta_i \in \{0, 1\}$ conforme a necessidade.

2.3 Equação Modal

Para obtenção da equação de autovalores do problema eliminamos as constantes C_i das equações (2.16) até chegarmos a uma equação que relaciona apenas as constantes das camadas 0 e N , como a que segue.

$$F_{\zeta_0 0}(r_0) C_0 = F_{\zeta_1 1}(r_0) F_{\zeta_1 1}(r_1)^{-1} F_{\zeta_2 2}(r_1) \cdots F_{\zeta_N N}(r_{N-1}) C_N \quad (2.17)$$

Neste ponto é importante notar que na camada interna da fibra, a solução precisa ser limitada em $\rho = 0$. Como ambas as funções de Bessel de segunda ordem Y_m e K_m divergem na origem, independentemente da escolha da representação da solução ($\zeta_0 \in \{0, 1\}$) na camada mais interna da fibra, $B_{10} = B_{20} = 0$. Além disso, na casca externa, a solução deve decair com ρ e deve ter forma evanescente ($\zeta_N = 1$) para que a onda tenha potência finita. Sendo assim, $A_{1N} = A_{2N} = 0$, deixando-nos com o seguinte sistema:

$$F_{\zeta_0 0}(r_0) \begin{bmatrix} A_{10} \\ 0 \\ A_{20} \\ 0 \end{bmatrix} = F_{\zeta_{11}}(r_0) F_{\zeta_{11}}(r_1)^{-1} F_{\zeta_{22}}(r_1) \cdots F_{1N}(r_{N-1}) \begin{bmatrix} 0 \\ B_{1N} \\ 0 \\ B_{2N} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \quad (2.18)$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{10} \\ 0 \\ A_{20} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ B_{1N} \\ 0 \\ B_{2N} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Por fim, para impormos infinitas soluções em (2.19), igualamos o seguinte determinante a zero. A equação resultante é da forma $f(k_0, \beta) = 0$ e basta utilizarmos um método de busca de raízes para encontrarmos os modos de propagação da fibra considerada para cada número de onda k_0 .

$$\begin{vmatrix} s_{11} & m_{12} & s_{13} & m_{14} \\ s_{21} & m_{22} & s_{23} & m_{24} \\ s_{31} & m_{32} & s_{33} & m_{34} \\ s_{41} & m_{42} & s_{43} & m_{44} \end{vmatrix} = 0 \quad (2.20)$$

2.4 Dispersão Material

Os índices de refração utilizados em cada camada das fibras foram considerados dependentes do comprimento de onda em questão. Utilizamos dois modelos distintos para representar essa dependência.

O primeiro modelo faz uso da equação de dispersão material da sílica pura no formato de

Sellmeier (2.22) com as constantes mostradas na tabela 2.1 obtidas em [15]. Segundo este modelo, cada camada é representada por um índice normalizado n'_i tal que:

$$n_i(\lambda) = n'_i n_{\text{SiO}_2}^2(\lambda) \quad (2.21)$$

$$n_{\text{SiO}_2}^2(\lambda) - 1 = \sum_{i=1}^3 \frac{C_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2} \quad (2.22)$$

para λ expresso em micrômetros. Esse modelo é simples de ser implementado, porém perde a validade para índices um pouco mais altos, por exemplo $n'_i > 1\%$.

Por causa de sua restrita faixa de aplicação esse modelo foi utilizado apenas no início dos trabalhos, sendo substituído por um segundo modelo apresentado em [16]. Neste segundo é proposta uma equação para representar o índice de refração da sílica em função da fração molar de dopantes presentes. A partir de dados experimentais, as constantes da equação (2.23) são fornecidas para sílica dopada com germânio em até 15 a 20% e flúor em até 2%. Essas constante estão também reproduzidas na tabela 2.1.

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \sum_{i=1}^3 \frac{(A_i + B_i^X f_m) \lambda^2}{\lambda^2 - z_i^2} \quad (2.23)$$

onde λ é também expresso em micrômetros, f_m é a fração molar do dopante na sílica e X indica o dopante em questão.

Tabela 2.1: Constantes das equações de dispersão material para os dois modelos utilizados.

Sílica pura		Sílica dopada			
C_1	0,6961663	A_1	0,2045154578	B_1^{Ge}	-0,1011783769
C_2	0,4079426	A_2	0,06451676258	B_2^{Ge}	0,1778934999
C_3	0,8974794	A_3	0,1311583151	B_3^{Ge}	-0,1064179581
λ_1	0,068043	z_1	0,06130807320	B_1^{F}	-0,05413938039
λ_2	0,1162414	z_2	0,1108859848	B_2^{F}	-0,1788588824
λ_3	9,896161	z_3	8,964441861	B_3^{F}	-0,07445931332

2.5 Resultados Numéricos

O método apresentado para solução da fibra permite teoricamente a determinação de todos os modos de propagação da estrutura em questão. A equação (2.20) pode, contudo, ser de difícil

tratamento em casos extremos, como por exemplo, perto das frequências de corte dos modos.

Dessa forma, para garantir que o programa implementado encontre as soluções desejadas, realizamos primeiramente testes de avaliação com estruturas conhecidas, especificamente a fibra convencional de baixo contraste de índices.

2.5.1 Fibra Convencional

Utilizando uma fibra de baixo contraste de índice e uma só camada no núcleo, fomos capazes de reproduzir o gráfico da constante de propagação b , velocidade e dispersão modais normalizadas *versus* frequência normalizada V encontrado na figura 5 de [15]. Esse gráfico encontra-se na figura 2.2.

$$V = k_0 r_0 \sqrt{n_0^2 - n_1^2} \quad (2.24)$$

$$b = \frac{\left(\frac{\beta}{k_0}\right)^2 - n_1^2}{n_0^2 - n_1^2} \quad (2.25)$$

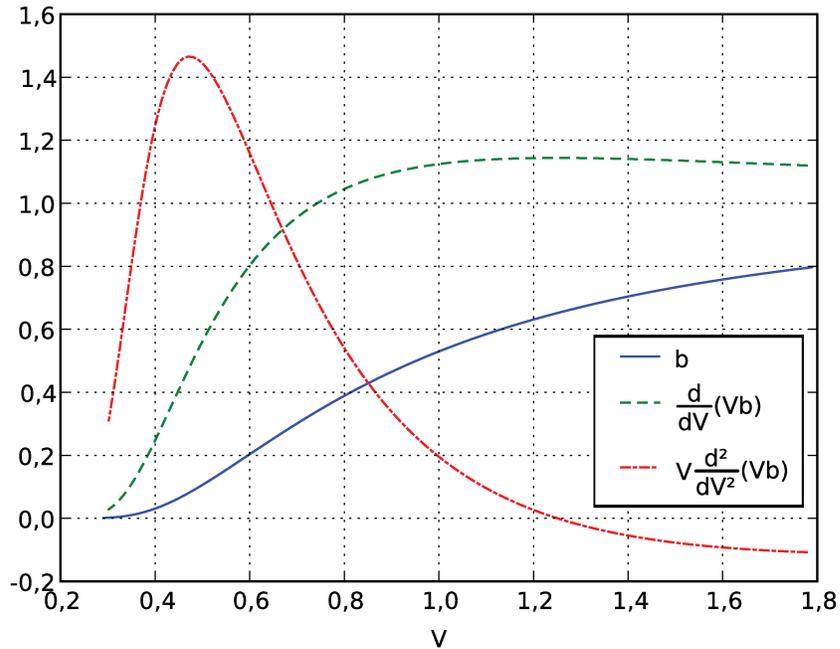


Figura 2.2: Parâmetros normalizados para o modo fundamental de uma fibra convencional de baixo contraste de índices.

Tendo em vista que o gráfico produzido apresenta curvas iguais às tomadas como referência, podemos concluir que nossa implementação está correta, pelo menos no caso de núcleo com uma só camada.

2.5.2 Fibra Multi-Camada

Não pudemos encontrar referências de fibras na literatura com dados completos que nos permitissem reproduzir suas curvas de dispersão para fins de comparação. Muitos perfis são apresentados, mas em geral não se especifica o modelo de dispersão material utilizado na solução modal, de forma que não temos informações suficientes para reprodução.

Por essa razão, resolvemos limitar-nos a testar alguns perfis de fibra com múltiplas camadas e fazer nossa verificação da solução utilizando os valores das constantes de propagação determinadas para calcular o formato das componentes do campo elétrico e verificarmos sua continuidade.

As figuras 2.3 a 2.5 mostram três exemplos aleatórios de perfis com duas, três e quatro camadas no núcleo e os campos obtidos a partir das constantes de propagação calculadas. Na figura 2.3 vemos um perfil de fibra com vácuo na região mais interna do núcleo. A componente azimutal do campo elétrico normalizado concentra-se na segunda camada, onde há efetivamente guiamento por reflexão interna total, enquanto a componente na direção de propagação z apresenta aí um nulo. Ambas são contínuas nas interfaces entre camadas.

A figura 2.4 mostra uma fibra de perfil tipo W com índice de refração máximo na primeira camada, onde concentram-se ambas componentes exibidas do campo elétrico normalizado. Novamente, ambas apresentam continuidade em todas as interfaces entre camadas.

A fibra de 4 camadas apresenta também vácuo em sua primeira camada. A distribuição do campo elétrico exibida na figura 2.5 mostra que a componente azimutal concentra-se nas regiões de mais alto índice de refração. Por outro lado, a componente longitudinal localiza-se principalmente na primeira e última interfaces. Como esperado, ambas componentes são contínuas em todo o domínio, em especial nas interfaces entre camadas.

Esses resultados adicionados aos obtidos anteriormente para a fibra convencional levam-nos a concluir que o algoritmo implementado fornece soluções modais corretas para a propagação nas fibras com as geometrias propostas.

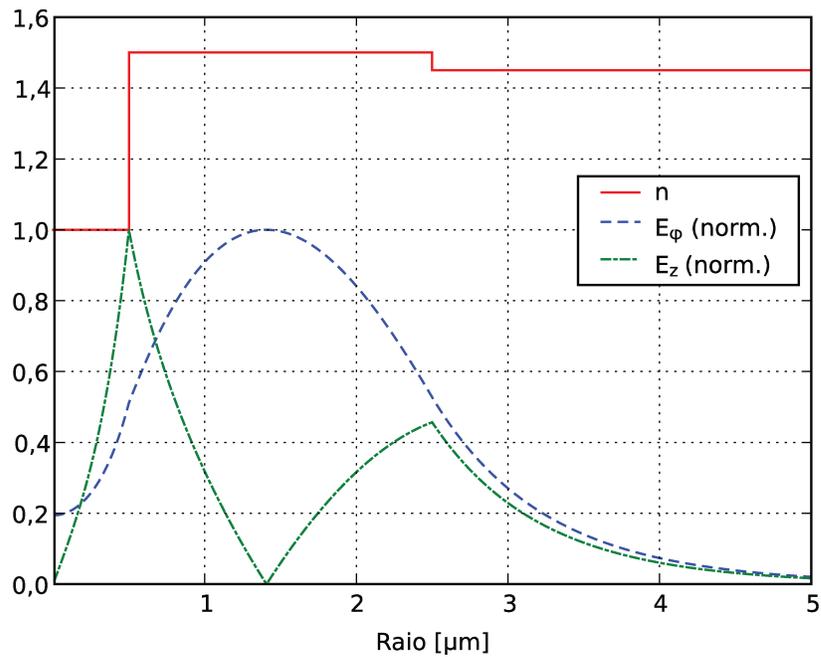


Figura 2.3: Perfil de índices de refração para uma fibra com 2 camadas no núcleo e componentes tangenciais normalizadas do campo elétrico calculadas em 1550 nm para o modo fundamental ($m = 1$).

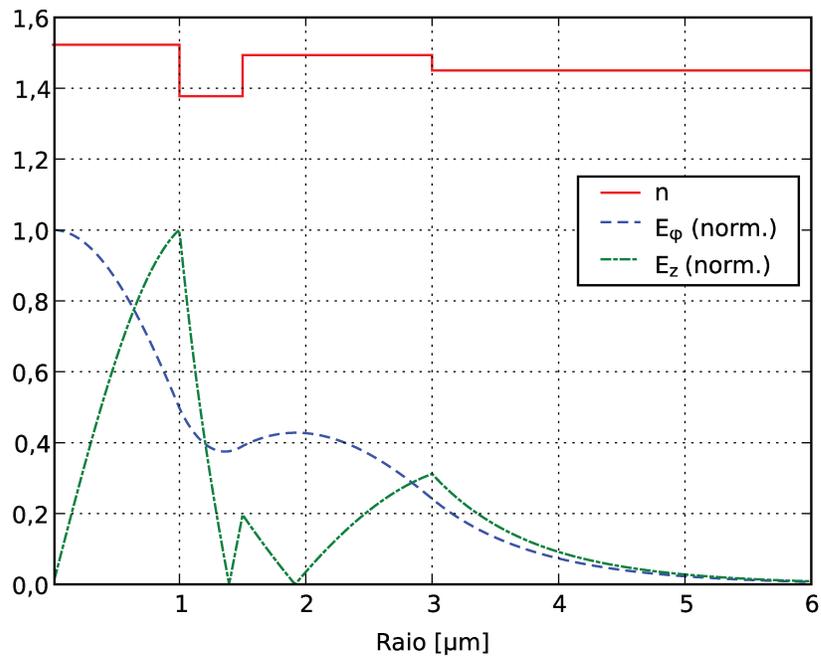


Figura 2.4: Perfil de índices de refração para uma fibra com 3 camadas no núcleo e componentes tangenciais normalizadas do campo elétrico calculadas em 1550 nm para o modo fundamental ($m = 1$).

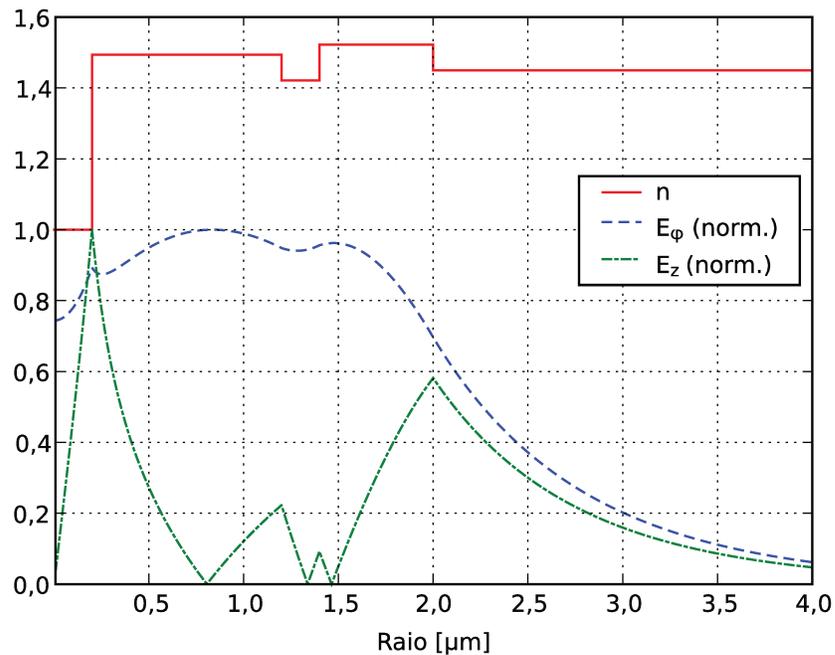


Figura 2.5: Perfil de índices de refração para uma fibra com 4 camadas no núcleo e componentes tangenciais normalizadas do campo elétrico calculadas em 1550 nm para o modo fundamental ($m = 1$).

2.6 Conclusão

Possuindo uma ferramenta para calcular eficientemente as constantes de propagação do modo fundamental das estruturas consideradas, estamos prontos para otimizar quaisquer parâmetros desejados relativos às curvas de dispersão dessas estruturas. No capítulo seguinte descrevemos quais foram as características que buscamos otimizar e como essa tarefa foi executada.

Capítulo 3

Otimização da Dispersão

O problema de otimização do perfil de índices da fibra óptica com base em suas curvas modais é um problema de programação não-linear. Há vários algoritmos conhecidos para solução desse tipo de problema, sendo atualmente comum o uso de algoritmos genéticos devido à sua eficiência e flexibilidade [17–19]. É preciso deixar claro, no entanto, que essa abordagem não garante que a solução obtida seja um máximo global ou mesmo local do problema (considerando que buscamos maximizar alguma medida de qualidade da solução), embora seja possível aumentar a probabilidade disso ocorrer através do ajuste dos parâmetros de configuração do algoritmo para uma busca mais extensiva do espaço de soluções.

Há ainda outros métodos de otimização já empregados com sucesso no caso de fibras ópticas. Em [12] os autores utilizam uma abordagem diferente para descrever as equações de caracterização dos FOPAs através de um sistema de inequações polinomiais. Tal construção possibilita a solução do problema a partir de uma técnica de programação convexa, que garante convergência para um ótimo global.

Nosso tratamento, contudo, não permite o uso dessa metodologia, pois buscando manter nosso modelo um pouco mais fiel à realidade, não nos é possível simplificar nosso sistema a inequações polinomiais. A vantagem de nossa abordagem é não otimizarmos simplesmente os coeficientes da curva de dispersão de uma fibra imaginária, mas sim o próprio perfil da fibra, calculando sua curva do modo fundamental de propagação e buscando otimizá-la afim de obtermos um FOPA de ganho plano em uma banda de pelo menos 150 nm.

3.1 Algoritmo Genético

Descrevemos aqui de maneira simplificada as características mais relevantes dos algoritmos genéticos. Um estudo muito mais aprofundado pode ser encontrado em [17–19].

Algoritmos genéticos são um tipo de algoritmo evolutivo amplamente utilizados em problemas de busca. A computação evolutiva utiliza técnicas baseadas em conceitos pertencentes às teorias de evolução biológicas, como herança, seleção, mutação e cruzamento.

Para utilizarmos o algoritmo genético na solução de determinado problema, cada possível solução (indivíduo), deve ter uma representação definida que permita a ela ser objeto das operações de mutação e cruzamento. A mutação gera um novo indivíduo a partir de um só pai alterando aleatoriamente um ou mais de seus parâmetros (genes). O cruzamento por sua vez toma dois indivíduos como pais e os combina gerando um ou mais indivíduos novos.

O algoritmo opera, de maneira simplificada, gerando inicialmente uma população aleatória de soluções. Enquanto um critério de parada não for atingido, um método de seleção escolhe os melhores indivíduos para reprodução, baseando-se em uma medida de qualidade (*fitness function*) de cada um. Novos indivíduos são gerados através de mutação e cruzamento e são inseridos na população tomando os lugares de outros possivelmente piores.

Fica assim claro o papel da medida de qualidade das soluções: ela é a função que será maximizada pelo algoritmo, de modo que sua definição é um dos pontos mais importantes na implementação. Ela deve necessariamente refletir da forma mais direta possível uma medida de todas as características desejadas para a solução final. Características deixadas de lado, possivelmente apresentarão valores inesperados que podem estragar a solução obtida caso a afetem mesmo indiretamente. Uma escolha equivocada da função de qualidade resultará em uma solução pouco útil para o problema.

Logicamente há ainda outras configurações que também devem ser corretamente definidas e que afetam a eficiência do algoritmo. Entre elas estão o tamanho da população inicial, que define a densidade de cobertura do espaço de busca, as probabilidades de cruzamento e mutação, o número de indivíduos criados a cada geração, as próprias funções de cruzamento e mutação, e o critério de seleção.

3.1.1 Otimização de Fibras Ópticas

O uso de algoritmos genéticos para otimização de amplificadores paramétricos já foi realizado com sucesso anteriormente. Em [20] uma banda de 300 nm é obtida em um FOPA de bombeio duplo. É feita também uma breve análise de flutuações do zero de dispersão considerando o coeficiente de dispersão de segunda ordem β_2 na frequência central do FOPA como uma soma de funções senoidais ao longo da fibra. As amplitudes dessas variações não são, entretanto, especificadas. O coeficiente de dispersão de quarta ordem β_4 é considerado constante e o algoritmo genético opera apenas na otimização de β_2 ao longo da fibra (dividida em um número fixo de seções) do amplificador. Os parâmetros otimizados são os mesmos em [7], onde os autores obtêm quase 350 nm de banda. Avalia-se aí também o efeito de flutuações da fibra a partir de β_2 e, separadamente, β_4 .

Esclarecemos que a notação aqui adotada é a mesma utilizada na maior parte dos textos relacionados a dispersões em fibras ópticas. Definimos as funções

$$\beta_i = \frac{\partial^i \beta}{\partial \omega^i}, \quad \forall i \in \mathbf{N}^*.$$

Fica clara nesse ponto a inovação introduzida por nossa abordagem de implementação do algoritmo genético. Nosso objetivo principal é conseguir um FOPA de banda elevada realizando simultaneamente uma análise mais intrínseca das flutuações provocadas por imperfeições na fibra, que se refletem não só em seu zero de dispersão, mas sim em sua solução modal de forma geral. Por essa razão aplicamos o algoritmo genético diretamente no perfil de índices da fibra e calculamos a partir dela as características que nos interessam.

Uma abordagem muito semelhante é utilizada em [21], onde também se mostram com mais clareza alguns detalhes da implementação do algoritmo. O objetivo do autor é, no entanto, diferente do nosso, pois ele busca uma fibra com baixa dispersão para comunicações de longa distância, e não para amplificadores. Além disso, também não é feito um estudo do impacto de flutuações do perfil da fibra na curva de dispersão obtida.

3.2 Implementação

A implementação do algoritmo foi feita através da biblioteca gratuita GALib [22]. Utilizamos um algoritmo do tipo *steady state*, em que a cada nova geração um número definido de novos indivíduos é criado a partir dos selecionados e inserido na população. O critério de seleção aplicado foi do tipo roleta (*roulette wheel*), isto é, cada indivíduo da população tem uma probabilidade de ser selecionado para reprodução proporcional à sua qualidade.

O algoritmo foi executado diversas vezes com diferentes parâmetros e sementes aleatórias. De forma geral, variamos o tamanho da população entre 500 e 4000 indivíduos, com renovação de 10% a 40% da população a cada geração. O número de gerações não foi limitado. O critério de parada foi determinado analisando as qualidades média e máxima da população a cada 10 gerações e interrompendo a execução ao atingirem patamares estáveis.

Os parâmetros da fibra representada por cada indivíduo são variáveis de ponto flutuante, como será descrito na seção 3.2.1. Desse modo, a mutação de cada gene selecionado seguiu uma distribuição gaussiana ao redor de seu valor original, e os cruzamentos entre dois indivíduos foram executados criando-se um novo cujos genes eram escolhidos aleatoriamente entre os genes correspondentes dos dois pais. As probabilidades de mutação e cruzamento foram mantidas entre 30% e 50%.

3.2.1 Representação

Descrevemos na seção 2.1 como é parametrizada a geometria da fibra óptica no nosso problema. A partir desta parametrização, a representação de cada fibra na forma de um conjunto de genes é bastante direta.

Cada indivíduo é formado por uma seqüência ordenada de $2N$ genes, sendo N o número de camadas da fibra anteriormente definido. A fração molar de dopante na camada i e sua espessura (ou raio, no caso da primeira camada) foram armazenadas respectivamente nos genes $2i$ e $2i + 1$, onde $i \in \{0, 1, \dots, N - 1\}$. Para a casca externa assumimos não haver dopante no material, de modo que seu índice de refração foi sempre o da sílica pura.

Por utilizarmos dois dopantes diferentes, consideramos a representação do gene da seguinte

maneira: genes com valor positivo indicam a fração molar de germânio no material; genes com valor negativo representam a fração molar de flúor (valor absoluto). A máxima fração molar de germânio permitida é de 18,4%, enquanto a de flúor é apenas 3,2%, com passos de 0,1% para ambas. Estes valores correspondem aproximadamente a variações de índice de refração de +2% a -1% em relação ao da sílica pura (casca externa).

Com relação aos limites de espessura, definimos um mínimo de 0,2 μm e um máximo de 6,0 μm com passos de 10 nm para cada camada, com exceção do núcleo mais interno, cujo máximo é de 3,0 μm . Este limite superior menor foi escolhido para diminuir um pouco o espaço de parâmetros evitando demasiadas fibras com múltiplos modos na banda de interesse.

3.2.2 Função de Qualidade

A escolha da função de qualidade foi feita com base nos estudos publicados em [6] e [8].

No capítulo 4 será mostrado que o ganho dos FOPAs é dependente de um parâmetro κ , que é função da potência P_0 inserida na fibra, do coeficiente de não-linearidade γ da fibra e do casamento $\Delta\beta$ entre as constantes de propagação dos sinais envolvidos na amplificação

$$\kappa = \Delta\beta + \gamma P_0$$

e que o ganho é máximo quando o parâmetro κ é nulo.

Expandindo-se a função $\beta(\omega)$ da fibra em série de Taylor ao redor da frequência angular central ω_c do amplificador é possível mostrar-se que

$$\Delta\beta = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\beta_{2n}(\omega_c)}{(2n)!} (\Delta\omega_s^{2n} - \Delta\omega_p^{2n}) \quad (3.1)$$

onde $\Delta\omega_s$ é a diferença entre a frequência angular do sinal a ser amplificado e ω_c , e $\Delta\omega_p$ é a diferença entre a frequência de um dos bombeios e ω_c . A função de cada um desses parâmetros ficará mais clara na seção 4.1.

Por ora basta observarmos que para a condição de casamento de fase (κ próximo de zero) ser satisfeita na maior banda possível, podemos truncar a expressão (3.1) em $2n = p$, de modo a descrever essa condição como uma aproximação polinomial para uma constante. É sabido que a família

de polinômios que melhor realiza tal aproximação é a de Chebyshev. Logo, podemos equacionar $\Delta\beta$ ao polinômio de Chebyshev $T_p(x)$ transladado e escalado de um fator s , que controlará o *ripple* do ganho.

$$\frac{\Delta\beta}{\gamma P_0} = -1 + s T_p\left(\frac{\Delta\omega_s}{\Delta\omega_t}\right) = -1 + s \cos\left(p \arccos\left(\frac{\Delta\omega_s}{\Delta\omega_t}\right)\right) \quad (3.2)$$

onde $\Delta\omega_t$ é a banda total de amplificação.

Substituindo-se (3.1) em (3.2), veremos que para obter uma banda elevada com ganho plano, nosso objetivo deve ser diminuir as dispersões de ordem par na frequência central. Contudo, a frequência central do FOPA não é conhecida durante o projeto das fibras, portanto trabalhamos na frequência onde ocorre o zero de dispersão da fibra ω_0 , pois sabemos que ω_c fica muito próximo desse valor.

Inicialmente, procuramos por perfis que tivessem o zero de dispersão λ_0 na região em 1500 nm e com dispersão de quarta ordem $\beta_4(\omega_0)$ positiva e menor possível, uma vez que utilizando $p = 4$ em (3.1) e (3.2), chegamos a:

$$\frac{\beta_2(\omega_0)}{\gamma P_0} = -\frac{8s}{\Delta\omega_t^2} \quad (3.3)$$

$$\frac{\beta_4(\omega_0)}{12\gamma P_0} = \frac{8s}{\Delta\omega_t^4} \quad (3.4)$$

Contudo, após obtermos os primeiros resultados do algoritmo genético, observamos que as curvas de ganho das fibras não apresentavam a característica esperada para fibras com $\beta_4(\omega_0) > 0$ segundo [8], isto é, com quatro máximos de ganho entre os bombeios, mas sim com dois desses máximos fora da banda de amplificação, o que resulta em maior *ripple* (ou, equivalentemente, menor banda). Como exemplo, a figura 3.1 mostra uma curva com cada uma dessas características. Desconsiderando-se dispersões de ordens mais elevadas o ganho da fibra com β_4 positivo apresenta quatro máximos locais na região entre os bombeios, o que não ocorre com a fibra de β_4 negativo.

Analisando as curvas de dispersão de mais alta ordem, concluímos que por $\beta_4(\omega_0)$ ser muito pequeno, a dispersão de sexta ordem $\beta_6(\omega_0)$, inicialmente desprezada, tem um efeito significativo no perfil de ganho do FOPA para os valores de largura de banda desejados. Adicionamos portanto aos objetivos da função de qualidade do algoritmo que o valor de $\beta_6(\omega_0)$ fosse reduzido e negativo (para compensar o valor positivo de $\beta_4(\omega_0)$), de modo a conseguirmos curvas de ganho mais

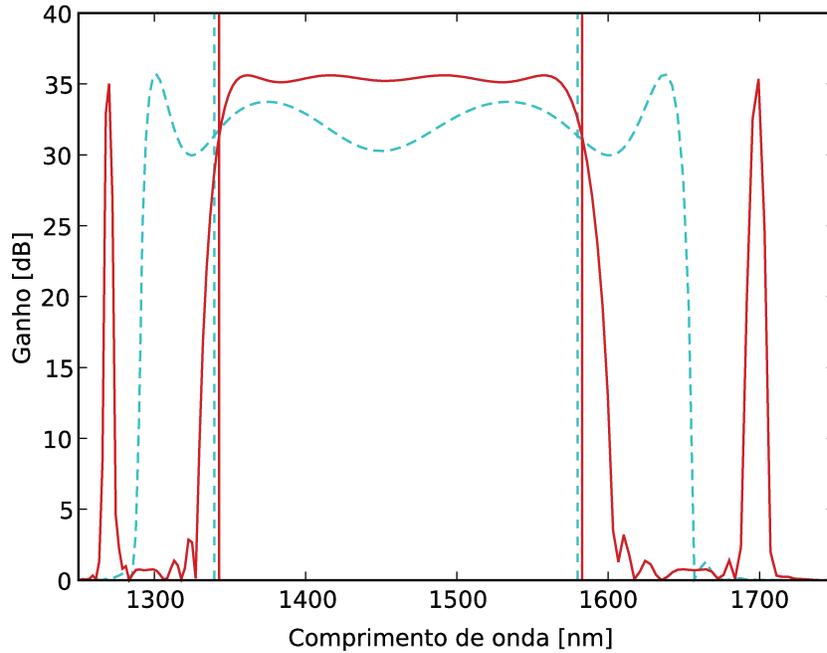


Figura 3.1: Exemplos de curvas de ganho paramétrico para fibras com β_4 positivo (linha contínua) e negativo (tracejada) como previstos ao se desconsiderar dispersões de ordens mais elevadas. Bombeios nas frequências representadas pelos traços verticais.

parecidos com as desejadas.

Outra abordagem, que parece até mais lógica, seria empregar o mesmo procedimento utilizado para chegarmos a (3.3) e (3.4) com $p = 6$, que implicaria em termos $\beta_4(\omega_0)$ e $\beta_6(\omega_0)$ idealmente negativo e positivo, respectivamente. Por outro lado, levando-se em conta a dificuldade envolvida na fabricação de uma fibra com dispersão de quarta ordem bem caracterizada, não nos parece mais razoável esperar que seja atualmente possível controlar a de sexta ordem, de modo que preferimos manter nosso truncamento em um polinômio de grau 4.

Outras considerações importantes para a qualidade da fibra são que ela seja monomodo em toda a banda desejada. Trabalhamos sempre com a maior banda de interesse para comunicações: de 1200 nm a 1700 nm, abrangendo desde a banda O até a banda U.

Desse modo, e seguindo o formato apresentado em [21], utilizamos inicialmente a seguinte figura de mérito:

$$Q_4 = \frac{C_4}{1 + \frac{(\lambda_0 - m_{\lambda_0})^2}{\sigma_{\lambda_0}^2} + \frac{(\beta_4(\omega_0) - m_{\beta_4})^2}{\sigma_{\beta_4}^2}} \quad (3.5)$$

com as constantes m_* e σ_* definidas na tabela 3.1 e C_4 dada por

$$C_4 = \begin{cases} 0 & \text{se } \beta_4(\omega_0) < 0; \\ 1 & \text{se } \beta_4(\omega_0) \geq 0 \text{ e a fibra não é monomodo na banda de interesse;} \\ 10 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.6)$$

Após a verificação da necessidade de incluirmos $\beta_6(\omega_0)$ no processo de otimização, utilizamos:

$$Q_6 = \frac{C_6}{1 + \frac{(\lambda_0 - m_{\lambda_0})^2}{\sigma_{\lambda_0}^2} + \frac{(\beta_4(\omega_0) - m_{\beta_4})^2}{\sigma_{\beta_4}^2} + \frac{(\beta_6(\omega_0) - m_{\beta_6})^2}{\sigma_{\beta_6}^2}} \quad (3.7)$$

com m_{β_6} e σ_{β_6} também definidas na tabela 3.1 e C_6 dada por:

$$C_6 = \begin{cases} 0 & \text{se } \beta_6(\omega_0) > 0; \\ C_4 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.8)$$

Tabela 3.1: Valores das constantes utilizadas na função de qualidade das fibras.

Grandeza	Objetivo (m_*)	Desvio (σ_*)
λ_0	1500 nm	50 nm
β_4	0	$5 \cdot 10^{-5}$ ps ⁴ /km
β_6	0	$2 \cdot 10^{-7}$ ps ⁶ /km

3.2.3 Sensibilidade

Faz-se imprescindível, dado nosso objetivo, incluirmos na medida de qualidade de cada fibra óptica a sua sensibilidade às variações dos parâmetros propostos para deformação neste trabalho. A inclusão dessa medida foi realizada considerando-se não diretamente a equação (3.5) – ou (3.7), no caso da inclusão de $\beta_6(\omega_0)$ na função de qualidade – como a qualidade da fibra, mas uma média ponderada dos valores dessa função calculada para a fibra originalmente representada pela cadeia de genes em questão e duas variações suas: uma com raios 1% maiores e outra 1% menores que ela. A escolha dessa variação deve-se ao fato da tolerância especificada para o diâmetro externo das fibras em seu processo de fabricação ser 1%.

É importante ainda esclarecermos que após a avaliação de (3.5) – ou (3.7) – para a fibra sem compressão ou expansão, a constante m_{λ_0} era alterada para o valor do zero de dispersão desta antes de avaliarem-se as fibras com deformação, de modo que o erro em relação a 1500 nm não era considerado três vezes, mas sim apenas a variação de λ_0 , qualquer que seja ele. Adicionalmente σ_{λ_0} era alterado para um terço do valor original (16,7 nm) visando intensificar a importância de uma solução com baixo desvio do zero de dispersão.

3.3 Resultados

Executamos o algoritmo genético com parâmetros ligeiramente diferentes para fibras de três e quatro camadas. No caso de quatro camadas os ganhos encontrados em relação às de três não foram sensíveis a ponto de compensarem o aumento de complexidade do problema, de modo que nos concentramos em soluções de três camadas.

Após obtermos boas soluções através do algoritmo, executamos ainda uma busca por exaustão entre as fibras na vizinhança das encontradas garantindo assim que atingimos um ponto de máximo local. Apresentamos a seguir duas fibras desenvolvidas por esse processo, identificadas como \mathcal{F}_3 e \mathcal{F}_4 .

A fibra \mathcal{F}_3 foi obtida utilizando-se (3.5) como função de qualidade. Seu perfil de índices de refração é mostrado na figura 3.2. Pode-se notar que o perfil segue um padrão W com as três camadas internas apresentando índices de refração maiores que o da sílica pura.

Já a fibra \mathcal{F}_4 foi obtida usando-se a função de qualidade (3.7). Assim como para \mathcal{F}_3 , esta, também exibida na figura 3.2, apresenta um padrão W. Entretanto o índice da segunda camada é mais baixo que o da sílica pura e o do núcleo mais interno é menor que o do perfil \mathcal{F}_3 .

Como critério de comparação criamos também uma fibra com uma camada de alto contraste de índices e com zero de dispersão localizado em 1500 nm, e outra com dispersão acentuadamente plana (além de alto contraste de índices), chamadas respectivamente de \mathcal{F}_1 e \mathcal{F}_2 e cujos perfis encontram-se também na figura 3.2.

A fibra \mathcal{F}_1 é projetada dentro do mesmo requisito imposto para as otimizadas quanto à sua casca, ou seja, que esta deve ser composta por sílica não dopada. Essa condição imposta em uma

fibra de índice degrau com contraste também dentro dos valores impostos para o algoritmo genético não nos permite gerar uma fibra com zero de dispersão ao redor de 1500 nm e dispersão de quarta ordem positiva (ver apêndice A).

Por outro lado, relaxamos as restrições no projeto da fibra \mathcal{F}_2 para que pudéssemos trabalhar com uma fibra de dispersão acentuadamente plana em uma faixa larga de frequências em nossa comparação [23].

Todas essas características são evidenciadas pela figura 3.3, onde mostramos o parâmetro de dispersão D de cada fibra, definido como [24]:

$$D = \frac{\partial^2 \beta}{\partial \lambda \partial \omega} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (3.9)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo.

Notamos nessas curvas que as variações do comprimento de onda onde ocorre o zero de dispersão das fibras otimizadas é sensivelmente menor que a de \mathcal{F}_1 e ainda mais reduzida em relação a \mathcal{F}_2 . Um resumo das principais características de cada fibra pode ser encontrada na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Principais parâmetros de cada fibra utilizada. Consideramos o zero central para \mathcal{F}_2 .

Parâmetro	\mathcal{F}_1	\mathcal{F}_2	\mathcal{F}_3	\mathcal{F}_4
λ_0 [nm]	1501,2	1644,0	1501,9	1452,9
$\Delta\lambda_0$ [nm]	37,9	598,0	14,5	13,9
$\beta(\omega_0)$ [rad/m]	$6,1069 \cdot 10^6$	$5,4976 \cdot 10^6$	$6,0566 \cdot 10^6$	$6,2501 \cdot 10^6$
$\beta_1(\omega_0)$ [ps/km]	$4,9803 \cdot 10^6$	$5,0159 \cdot 10^6$	$4,8970 \cdot 10^6$	$4,8797 \cdot 10^6$
$\beta_3(\omega_0)$ [ps ³ /km]	$5,5476 \cdot 10^{-2}$	$-1,1677 \cdot 10^{-3}$	$2,2702 \cdot 10^{-1}$	$2,0187 \cdot 10^{-1}$
$\beta_4(\omega_0)$ [ps ⁴ /km]	$-1,0467 \cdot 10^{-4}$	$1,2388 \cdot 10^{-5}$	$6,7020 \cdot 10^{-6}$	$1,1113 \cdot 10^{-5}$
$\beta_5(\omega_0)$ [ps ⁵ /km]	$7,4171 \cdot 10^{-7}$	$1,2072 \cdot 10^{-6}$	$2,7740 \cdot 10^{-6}$	$3,0647 \cdot 10^{-6}$
$\beta_6(\omega_0)$ [ps ⁶ /km]	$-6,3822 \cdot 10^{-9}$	$-1,4199 \cdot 10^{-8}$	$-2,2672 \cdot 10^{-8}$	$-5,7101 \cdot 10^{-9}$

É possível observar de imediato o efeito da otimização pelo algoritmo genético na variação de λ_0 das fibras, que é de quase 40 nm em \mathcal{F}_1 e cai para menos de 15 nm nas otimizadas, ou seja, menos da metade. Quanto à fibra de dispersão plana, fica bem claro o motivo pelo qual essa variação é tão grande (quase 600 nm) ao observar-se a figura 3.3. O efeito da redução e da expansão da seção transversal da fibra \mathcal{F}_2 é próximo ao de uma translação no eixo das ordenadas de sua curva de dispersão, que tem em λ_0 uma derivada de baixo valor $-\beta_3(\omega_0)$ reduzido $-$, de modo que mesmo uma pequena translação provoque uma variação muito grande da sua raiz.

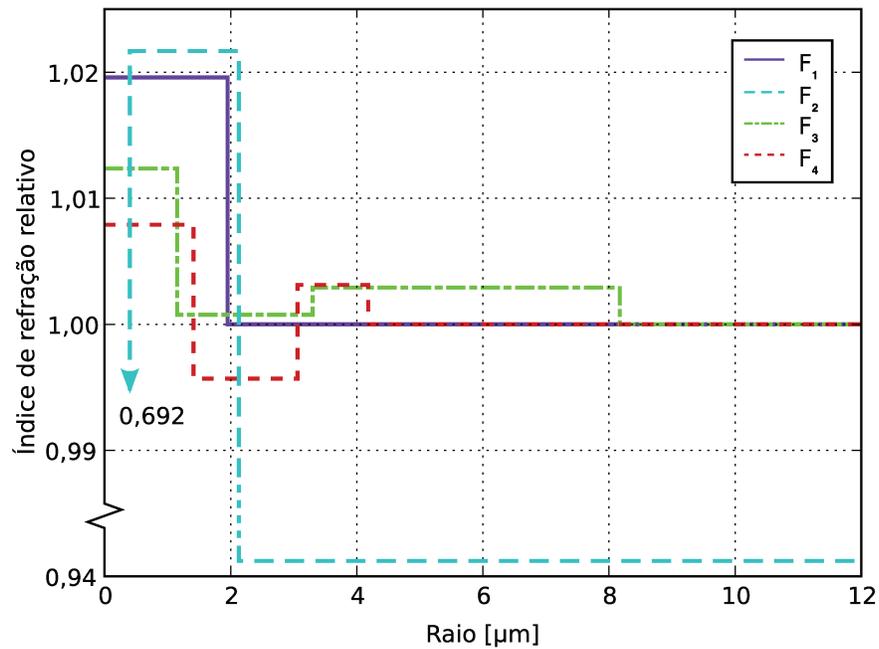


Figura 3.2: Perfis de índices de refração das fibras utilizadas. Os índices, calculados em 1550 nm, estão normalizados pelo da sílica pura neste mesmo comprimento de onda.

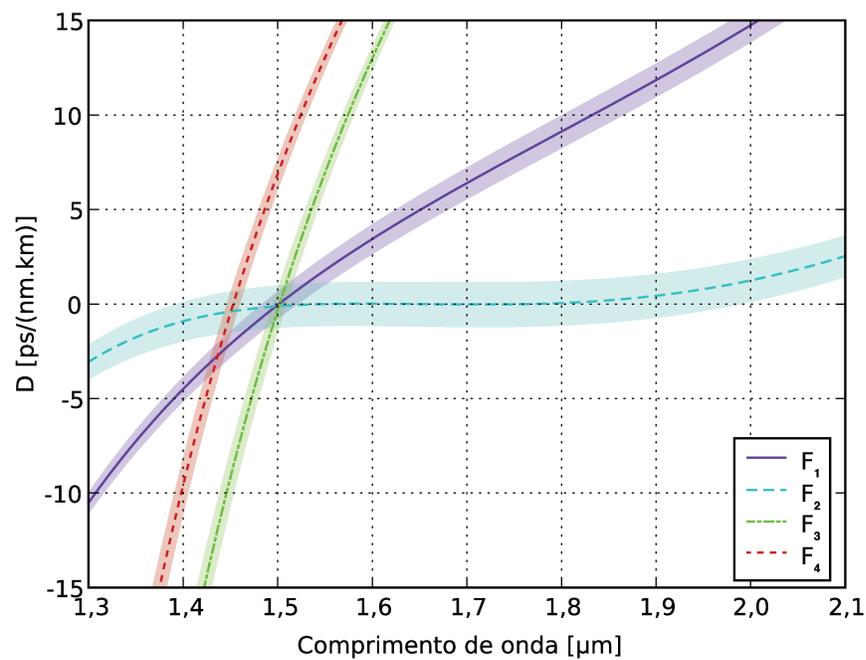


Figura 3.3: Curvas de dispersão das fibras utilizadas. A área preenchida sob cada curva indica sua região de variação quando a seção transversal da fibra é deformada entre -1% e +1%.

Quanto aos parâmetros $\beta_4(\omega_0)$ e $\beta_6(\omega_0)$, pode-se argumentar que não há diferença tão acentuada entre as fibras \mathcal{F}_3 , \mathcal{F}_4 e a fibra \mathcal{F}_2 , ou até mesmo \mathcal{F}_1 no caso de $\beta_6(\omega_0)$. Isso acontece porque as \mathcal{F}_1 e \mathcal{F}_2 também foram criadas para exibir boa amplificação paramétrica e, conseqüentemente, devem apresentar dispersões de ordem par naturalmente baixas próximo de λ_0 . O diferencial de \mathcal{F}_3 e \mathcal{F}_4 é exatamente manter (e, se possível, melhorar) essa característica procurando principalmente minimizar a sensibilidade da curva de dispersão às deformações propostas.

Para demonstrar a maior robustez das fibras desenvolvidas através do algoritmo genético apresentamos os gráficos das figuras 3.4 a 3.6. O gráfico do zero de dispersão na figura 3.4 mostra muito nitidamente que a curva de \mathcal{F}_1 é bem mais inclinada que as de \mathcal{F}_3 e \mathcal{F}_4 , que possuem inclinação parecida. A fibra \mathcal{F}_2 não é apresentada nestas comparações pois a variação de seus parâmetros é muito maior que a das demais.

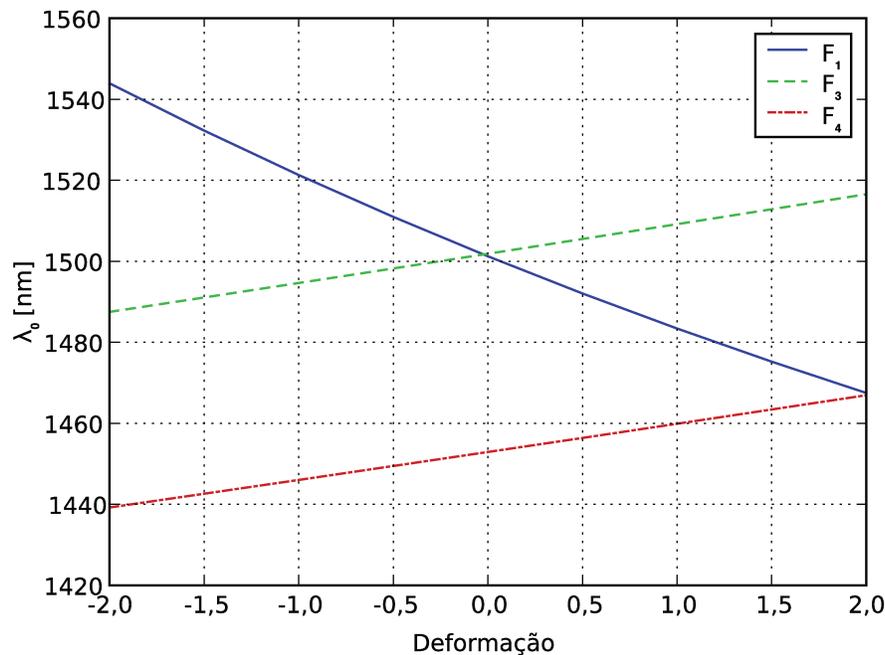


Figura 3.4: Variação do zero de dispersão das fibras desenvolvidas através do algoritmo genético e da fibra de uma camada em função da deformação da fibra.

A figura 3.5 mostra como a fibra \mathcal{F}_1 não se encontra na região de $\beta_4(\omega_0)$ positivo, enquanto que ambas as demais sim, em todo intervalo de deformações entre $\pm 1,0\%$. Finalmente, com relação ao coeficiente de sexta ordem, embora as três fibras tenham $\beta_6(\omega_0)$ negativo, a curva de \mathcal{F}_4 tem valores

muito mais próximos de zero que a de \mathcal{F}_3 , como esperado, pois apenas aquela foi otimizada com a inclusão desse objetivo (figura 3.6).

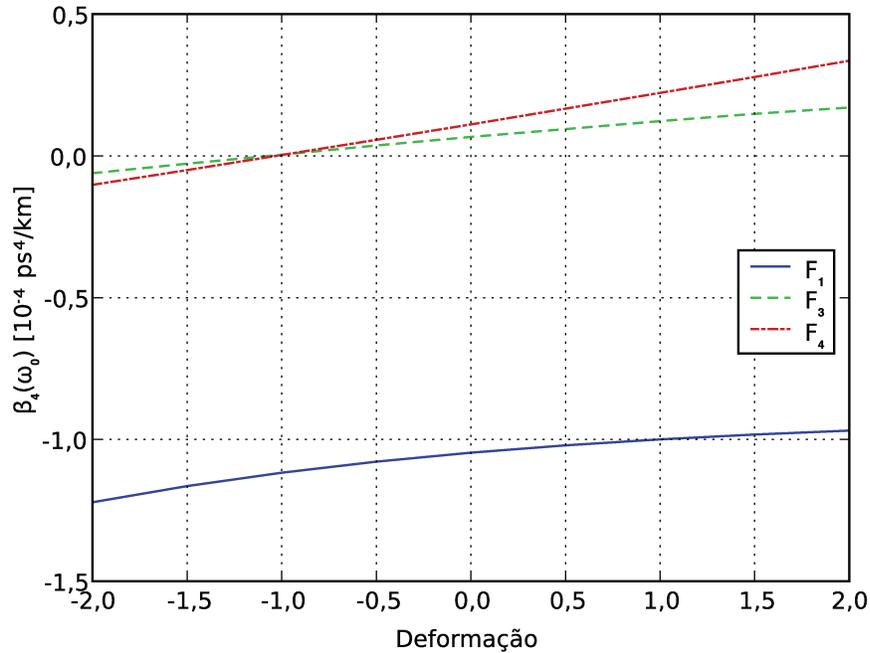


Figura 3.5: Variação de $\beta_4(\omega_0)$ para as fibras desenvolvidas através do algoritmo genético e para a fibra de uma camada em função da deformação da fibra.

3.4 Conclusão

As fibras obtidas a partir do método descrito neste capítulo foram otimizadas indiretamente para uso em amplificadores paramétricos. Utilizamos um modelo para descrever o ganho dos FOPAs e, trabalhando algebricamente suas equações, pudemos encontrar uma relação entre os parâmetros de dispersão da fibra e sua característica de amplificação paramétrica. Escolhemos, então uma medida de qualidade com base nesses parâmetros, calculados eficientemente através do método apresentado no capítulo 2.

Idealmente, a fibra deveria ser otimizada considerando-se diretamente uma figura de mérito baseada no FOPA que ela permite construir, como o produto entre a largura de banda e o ganho do amplificador, mais sua robustez. Entretanto, a realização de um FOPA para cada indivíduo da população de fibras do algoritmo genético seria feita através de uma busca por força bruta e,

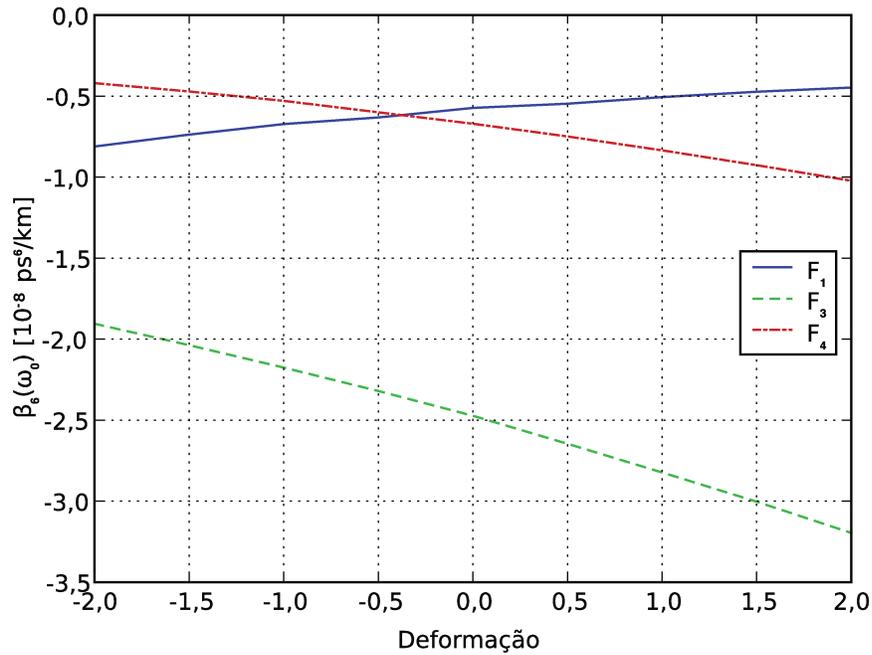


Figura 3.6: Variação de $\beta_6(\omega_0)$ para as fibras desenvolvidas através do algoritmo genético e para a fibra de uma camada em função da deformação da fibra.

portanto, requereria um poder computacional muito maior que sua simples solução modal.

Por efetuarmos nosso desenvolvimento indiretamente, devemos então comprovar a utilidade das fibras geradas realizando os amplificadores e demonstrando sua superioridade em relação àqueles que usam as fibras tomadas para comparação e, na medida do possível, em relação a resultados reportados na literatura. No capítulo 4 mostraremos tais resultados de modo a comprovar que nossa abordagem verdadeiramente nos permite desenvolver fibras com boas características de amplificação e maior robustez quanto ao tipo de deformação analisado.

Capítulo 4

Amplificador Paramétrico

A idéia dos amplificadores paramétricos surgiu do estudo em fibras ópticas de efeitos não-lineares que comprometiam transmissões de longas distâncias a altas taxas. Hoje conhece-se uma grande variedade de efeitos não-lineares em fibras, como a auto-modulação de fase, a modulação cruzada de fase, os efeitos Raman e Brillouin e o FWM (mistura a quatro ondas – *four wave mixing*), sendo este último o responsável pela amplificação paramétrica.

Os FOPAs podem ser divididos em categorias distintas baseadas no número de bombeios que utilizam. Bombeios são os sinais introduzidos na fibra óptica do amplificador responsáveis por fornecer a energia para amplificação. Normalmente eles possuem potência muito maior que a dos sinais a serem amplificados, razão pela qual podemos considerar suas equações diferenciais desacopladas das equações dos outros sinais no modelo de quatro ondas, como será visto na seção 4.1. Tratamos em nosso estudo apenas de amplificadores com dois bombeios, pois apresentam banda mais larga – ou maior potencial de banda larga – que os modelos de apenas um bombeio.

O modelo de quatro ondas nos fornece uma equação analítica simples que mostra o funcionamento dos FOPAs. É possível também utilizar-se um modelo um pouco mais completo que inclui duas componentes a mais [24], mas preferimos manter nosso modelo analítico mais simples e computacionalmente mais rápido, pois ele é usado intensivamente na otimização dos FOPAs, e validar os resultados obtidos ao final utilizando um método numérico que inclui um número ilimitado de componentes de sinal, em vez de apenas quatro ou seis ondas.

O método numérico empregado, chamado SSFM (*Split-Step Fourier Method*), já é conhecido na

literatura e empregado na solução da NLSE (equação não-linear de Schrödinger – *non-linear Schrödinger equation*). Em especial, empregamos aqui a implementação chamada UPM (método do princípio de incerteza – *uncertainty principle method*) [25]. Na seção 4.2 apresentamos a dedução da NLSE a que se aplica o método, mas não o discutiremos em detalhe, pois isso fugiria do escopo deste trabalho. Como mencionamos, o método numérico é utilizado apenas ao final das simulações para validar os resultados, pois é mais abrangente em relação aos efeitos não-lineares considerados e faz uso de menos aproximações.

A inclusão das flutuações do diâmetro da fibra do amplificador foi realizada com base em um modelo estocástico, que será detalhado na seção 4.3. Logo após, discutiremos os pontos relevantes do algoritmo utilizado para otimizar os FOPAs e em seguida apresentaremos os resultados obtidos para os perfis de fibras otimizados através do algoritmo genético descrito no capítulo 3. Por fim, discutiremos esses resultados e suas implicações tanto para a execução de um FOPA real, quanto para a fabricação de fibras com essa finalidade.

Contudo, antes de apresentarmos em mais detalhes os modelos de solução empregados, devemos apontar que ambos utilizam notações escalares para os campos. Essa escolha auxilia diretamente na menor complexidade dos algoritmos, implicando porém em algumas hipóteses que não podem ser ignoradas. Podemos considerar os campos escalares na medida em que todas as suas componentes propagam-se em uma mesma polarização. Descartamos, portanto, dessa análise quaisquer efeitos relacionados à birrefringência das fibras ou, mais especificamente, à PMD (dispersão de polarização de modo – *polarization mode dispersion*). Uma vez que os comprimentos de propagação em questão sejam relativamente curtos, é possível ignorar a ação da PMD e obter-se resultados consistentes. Como veremos mais adiante, todas as fibras estudadas possuem comprimentos abaixo de 300 m, o que nos permite analisá-las dentro de nosso modelo escalar.

4.1 Modelo de Quatro Ondas

A teoria que explica o funcionamento dos amplificadores paramétricos pode ser desenvolvida com base em um modelo de quatro ondas, como mostrado brevemente nesta seção. Maiores detalhes dessa dedução podem ser encontrados em [24] e [26]. Consideramos neste modelo o campo

eletromagnético composto por quatro componentes: dois bombeios de alta potência; um sinal que se deseja amplificar; e um sinal escravo (*idler*), que surge naturalmente no processo de FWM por conservação de momento.

Partimos da equação de onda em um meio não magnético e sem cargas:

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2} \quad (4.1)$$

onde t é a variável temporal, μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, \vec{E} é o vetor campo elétrico e \vec{P} o vetor densidade de polarização, que pode ser dividido em uma parte linear \vec{P}_L e uma não-linear \vec{P}_N , dadas por (4.3) e (4.4) respectivamente.

Em especial tratamos da sílica como meio fundamental e, sendo ela isotrópica, podemos relacionar os vetores \vec{E} e \vec{P} através da permissividade elétrica do vácuo ϵ_0 e das suscetibilidades do material χ de primeira e terceira ordens.

$$\vec{P} = \vec{P}_L + \vec{P}_N \quad (4.2)$$

$$\vec{P}_L = \epsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} \chi^{(1)}(t - t_1) \vec{E}(t_1) dt_1 \quad (4.3)$$

$$\vec{P}_N = \epsilon_0 \iiint_{-\infty}^{\infty} \chi^{(3)}(t - t_1, t - t_2, t - t_3) \vec{E}(t_1) \vec{E}(t_2) \vec{E}(t_3) dt_1 dt_2 dt_3 \quad (4.4)$$

Desenvolvemos as equações de acoplamento entre os bombeios, o sinal original e o escravo supondo o campo elétrico formado por quatro componentes senoidais com frequências angulares ω_1 a ω_4 , linearmente polarizadas em \hat{x} e propagando-se na direção \hat{z} .

$$\vec{E} = \hat{x} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \left(E_i e^{j(\beta_i z - \omega_i t)} + E_i^* e^{-j(\beta_i z - \omega_i t)} \right) \quad (4.5)$$

com β_i as constantes de propagação de cada componente espectral ω_i .

Podemos ainda descrever cada componente do campo E_i como produto de uma distribuição modal $F_i(x, y)$ e um envelope de propagação $A_i(z)$, de modo que utilizando as equações (4.1) a (4.5)

obtemos:

$$\frac{dA_1}{dz} = j \frac{n_2 \omega_1}{c} \left[\left(f_{11}|A_1|^2 + 2 \sum_{i \neq 1} f_{1i}|A_i|^2 \right) A_1 + 2f_{1234}A_2^*A_3A_4 e^{j\Delta\beta z} \right] \quad (4.6)$$

$$\frac{dA_2}{dz} = j \frac{n_2 \omega_2}{c} \left[\left(f_{22}|A_2|^2 + 2 \sum_{i \neq 2} f_{2i}|A_i|^2 \right) A_2 + 2f_{2134}A_1^*A_3A_4 e^{j\Delta\beta z} \right] \quad (4.7)$$

$$\frac{dA_3}{dz} = j \frac{n_2 \omega_3}{c} \left[\left(f_{33}|A_3|^2 + 2 \sum_{i \neq 3} f_{3i}|A_i|^2 \right) A_3 + 2f_{3412}A_1A_2A_4^* e^{-j\Delta\beta z} \right] \quad (4.8)$$

$$\frac{dA_4}{dz} = j \frac{n_2 \omega_4}{c} \left[\left(f_{44}|A_4|^2 + 2 \sum_{i \neq 4} f_{4i}|A_i|^2 \right) A_4 + 2f_{4312}A_1A_2A_3^* e^{-j\Delta\beta z} \right] \quad (4.9)$$

onde n_2 é o índice de refração não-linear do material (associado à sua susceptibilidade de terceira ordem $\chi^{(3)}$), o descasamento $\Delta\beta$ é dado por:

$$\Delta\beta = \beta_3 + \beta_4 - \beta_1 - \beta_2$$

e as integrais de sobreposição f_{mn} e f_{mnpq} são definidas a partir das distribuições modais de cada componente:

$$f_{mn} = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} |F_m|^2 |F_n|^2 dx dy}{\left(\iint_{-\infty}^{\infty} |F_m|^2 dx dy \right) \left(\iint_{-\infty}^{\infty} |F_n|^2 dx dy \right)} \quad (4.10)$$

$$f_{mnpq} = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} F_m^* F_n^* F_p F_q dx dy}{\prod_{i \in \{m,n,p,q\}} \left(\iint_{-\infty}^{\infty} |F_i|^2 dx dy \right)^{1/2}} \quad (4.11)$$

Para simplificar a solução do sistema de equações diferenciais acopladas (4.6) a (4.9), podemos aproximar as integrais de sobreposição pelo inverso da área efetiva A_{eff} do modo, calculada em uma frequência central ω_c . Note que essa aproximação é válida apenas no caso em que as 4 componentes do campo propagam-se no mesmo modo, o que está de acordo com nosso problema já que trabalhamos apenas no modo fundamental das fibras. Assim:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint_{-\infty}^{\infty} |F(x,y)|^2 dx dy \right)^2}{\iint_{-\infty}^{\infty} |F(x,y)|^4 dx dy} \quad (4.12)$$

Outra aproximação que introduzimos é a do coeficiente de não-linearidade γ :

$$\frac{n_2\omega_i}{cA_{\text{eff}}} \approx \gamma, \quad \forall i \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (4.13)$$

com a qual obtemos o sistema que segue.

$$\frac{dA_1}{dz} = j\gamma \left[\left(|A_1|^2 + 2 \sum_{i \neq 1} |A_i|^2 \right) A_1 + 2A_2^* A_3 A_4 e^{j\Delta\beta z} \right] \quad (4.14)$$

$$\frac{dA_2}{dz} = j\gamma \left[\left(|A_2|^2 + 2 \sum_{i \neq 2} |A_i|^2 \right) A_2 + 2A_1^* A_3 A_4 e^{j\Delta\beta z} \right] \quad (4.15)$$

$$\frac{dA_3}{dz} = j\gamma \left[\left(|A_3|^2 + 2 \sum_{i \neq 3} |A_i|^2 \right) A_3 + 2A_1 A_2 A_4^* e^{-j\Delta\beta z} \right] \quad (4.16)$$

$$\frac{dA_4}{dz} = j\gamma \left[\left(|A_4|^2 + 2 \sum_{i \neq 4} |A_i|^2 \right) A_4 + 2A_1 A_2 A_3^* e^{-j\Delta\beta z} \right] \quad (4.17)$$

É possível resolver as equações (4.14) a (4.17) analiticamente fazendo uso de funções hiperbólicas, entretanto podemos considerar ainda que o FOPA será empregado utilizando-se os bombeios com potência muito superior às do sinal e do escravo, de modo que a depleção sofrida por eles ao longo da fibra possa ser desprezada.

Veremos mais tarde que essa aproximação é realmente válida, pois os perfis de ganho obtidos são praticamente iguais aos obtidos através do SSFM, que não faz essa suposição. Portanto, desacoplando as equações (4.14) e (4.15) de A_3 e A_4 e supondo constantes as potências dos bombeios, chegamos rapidamente às soluções para os envelopes A_1 e A_2 .

$$A_1(z) = |A_1| e^{j\gamma(P_0 + |A_2|^2)z} \quad (4.18)$$

$$A_2(z) = |A_2| e^{j\gamma(P_0 + |A_1|^2)z} \quad (4.19)$$

onde

$$P_0 = |A_1|^2 + |A_2|^2.$$

Substituindo os resultados anteriores em (4.16) e (4.17) e desprezando os termos $|A_3|^2$ e $|A_4|^2$ em

favor de P_0 , obtemos o seguinte sistema de equações diferenciais acopladas:

$$\frac{dA_3}{dz} = j\gamma P_0 \left(2A_3 + f_P A_4^* e^{-j(\Delta\beta - 3\gamma P_0)z} \right) \quad (4.20)$$

$$\frac{dA_4^*}{dz} = -j\gamma P_0 \left(2A_4^* + f_P A_3 e^{j(\Delta\beta - 3\gamma P_0)z} \right) \quad (4.21)$$

onde:

$$f_P = \frac{2|A_1||A_2|}{P_0}.$$

É possível resolver o sistema anterior lançando-se mão da substituição de variáveis:

$$A_i = B_i e^{j2\gamma P_0 z}, \quad \forall i \in \{3, 4\} \quad (4.22)$$

de maneira a obtermos as soluções descritas a seguir.

$$B_3(z) = (\Theta_1 e^{gz} + \Theta_2 e^{-gz}) e^{-j\frac{\kappa}{2}z} \quad (4.23)$$

$$B_4^*(z) = -\frac{1}{\gamma P_0 f_P} \left[\Theta_1 \left(\frac{\kappa}{2} + jg \right) e^{gz} + \Theta_2 \left(\frac{\kappa}{2} - jg \right) e^{-gz} \right] e^{j\frac{\kappa}{2}z} \quad (4.24)$$

onde Θ_1 e Θ_2 são constantes de integração determinadas pela condição inicial (potências introduzidas na fibra) e a defasagem κ e o fator de ganho g são dados por:

$$\kappa = \Delta\beta + \gamma P_0 \quad (4.25)$$

$$g = \sqrt{(\gamma P_0 f_P)^2 - \left(\frac{\kappa}{2} \right)^2} \quad (4.26)$$

Pode-se mostrar com algum esforço algébrico que a relação entre os campos em um ponto z_0 qualquer da fibra e em $z_0 + \Delta z$ pode ser escrita de forma matricial.

$$\begin{bmatrix} B_3(z_0 + \Delta z) \\ B_4^*(z_0 + \Delta z) \end{bmatrix} = T e^{-j\frac{\kappa}{2}\Delta z} \begin{bmatrix} B_3(z_0) \\ B_4^*(z_0) \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

$$T = \begin{bmatrix} \cosh(g\Delta z) + j\frac{\kappa}{2g} \sinh(g\Delta z) & j\frac{\gamma P_0 f_P}{g} \sinh(g\Delta z) \\ -j\frac{\gamma P_0 f_P}{g} \sinh(g\Delta z) & \cosh(g\Delta z) - j\frac{\kappa}{2g} \sinh(g\Delta z) \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

onde a matriz T pode ser utilizada para calcular o ganho do FOPA. Como ela não depende do ponto inicial z_0 , T pode ser vista como uma matriz de transferência entre os sinais de entrada e saída em um trecho qualquer de fibra com tamanho Δz .

4.2 Equação Não-Linear de Schrödinger

O modelo de quatro ondas anterior é útil para tratar casos onde há um número pequeno de frequências bem definidas no espectro do sinal óptico que atravessa a fibra. Quando esse espectro se torna mais complexo, é necessário um modelo mais geral para tratar as interações entre todas as componentes, que nos levará a uma equação não-linear de Schrödinger.

Deduzimos a seguir essa equação com base em [26], onde se considera primeiramente o problema na ausência de não-linearidade e a seguir acrescenta-se sua contribuição na forma de perturbação. Partimos da transformada de Fourier do envelope de propagação lentamente variável $\vec{A}(z, t)$ do campo \vec{E} na origem.

$$\vec{A}(0, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \vec{B}(\Omega) e^{-j\Omega t} d\Omega \quad (4.29)$$

onde $\vec{B}(\Omega)$ é a componente espectral na frequência Ω relativa a uma frequência central ω_c tal que

$$\Omega = \omega - \omega_c.$$

Considerando propagação linear na fibra com coeficiente de atenuação α , temos:

$$\vec{A}(z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \vec{B}(\Omega) e^{-\frac{\alpha}{2}z} e^{j\{[\beta(\omega) - \beta(\omega_c)]z - \Omega t\}} d\Omega \quad (4.30)$$

Derivando (4.30) com respeito a z e t , obtemos, respectivamente:

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial z}(z, t) = -\frac{\alpha}{2} \vec{A}(z, t) + \int_{-\infty}^{\infty} j[\beta(\omega) - \beta(\omega_c)] \vec{B}(\Omega) e^{-\frac{\alpha}{2}z} e^{j\{[\beta(\omega) - \beta(\omega_c)]z - \Omega t\}} d\Omega \quad (4.31)$$

$$\frac{\partial^m \vec{A}}{\partial t^m}(z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} (-j\Omega)^m \vec{B}(\Omega) e^{-\frac{\alpha}{2}z} e^{j\{[\beta(\omega) - \beta(\omega_c)]z - \Omega t\}} d\Omega \quad (4.32)$$

Usando-se a expansão de $\beta(\omega)$ em série de Fourier em torno de ω_c :

$$\beta(\omega) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{d^m \beta}{d\omega^m}(\omega_c) \frac{\Omega^m}{m!} = \sum_{m=0}^{\infty} \beta_m(\omega_c) \frac{\Omega^m}{m!} \quad (4.33)$$

podemos combinar (4.31) e (4.32) para chegarmos à seguinte equação diferencial.

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial z}(z, t) + \frac{\alpha}{2} \vec{A}(z, t) - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{j^{m+1}}{m!} \beta_m(\omega_c) \frac{\partial^m \vec{A}}{\partial t^m}(z, t) = 0 \quad (4.34)$$

Essa equação é exata, pois é resultado direto da propagação linear que impusemos em \vec{A} . Supondo o campo linearmente polarizado, podemos agora incluir os efeitos da não-linearidade como uma perturbação de (4.34) através das equações (4.1) a (4.5), obtendo a NLSE:

$$\frac{\partial A}{\partial z}(z, t) + \frac{\alpha}{2} A(z, t) - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{j^{m+1}}{m!} \beta_m(\omega_c) \frac{\partial^m A}{\partial t^m}(z, t) = j\gamma |A(z, t)|^2 A(z, t) \quad (4.35)$$

Como mencionamos, essa equação pode ser resolvida numericamente através do SSFM [25] e, embora seja mais geral em relação à arbitrariedade do campo de entrada, requer muito mais poder computacional que o uso da matriz de transferência (4.28) obtida pelo modelo de quatro ondas.

4.3 Modelo de Flutuações

Como já mencionado, incluímos em nosso estudo flutuações na geometria da fibra na forma de compressões e expansões de sua seção transversal. O modelo utilizado para essas flutuações ao longo da fibra do amplificador corresponde ao modelo I apresentado em [10] aplicado, porém, ao diâmetro da fibra, e não no descasamento de fases κ , como é feito pelos autores.

A variação dos diâmetros da fibra é considerada uma variável aleatória gaussiana com média nula e desvio padrão σ_R . Modelamos a fibra como sendo composta por um número de seções longitudinais, cada uma tendo uma deformação dada por uma realização desta variável, de modo que a fibra apresenta flutuação constante por partes ao longo de si.

Os saltos de variação são modelados como uma variável aleatória com distribuição de Poisson e distância média entre eventos dada por um comprimento de correlação L_C , que é uma escala de

comprimento típica em que ocorrem as flutuações. O comprimento de correlação pode ser compreendido mais claramente ao considerarmos as origens das deformações. Durante sua fabricação as fibras deformam-se por consequência de vibrações e variações dos diversos parâmetros de controle do processo, entre outros fatores.

Imaginemos o seguinte experimento: dado um trecho de fibra, escolhemos um valor de distância e comparamos os diâmetros de diversos pares de seções dessa fibra separados pela distância escolhida. Para uma distância muito pequena, veremos que os diâmetros das seções são muito próximos – no limite da distância escolhida ser zero, teríamos valores idênticos. Entretanto, conforme aumentamos a distância, os diâmetros de cada par de seções separados por essa distância vão perdendo a correlação. A partir de um dado valor, observaremos que a segunda medida de cada par não tem relação alguma com a primeira (ver figura 4.1). Dentro deste contexto, definimos o comprimento de correlação como uma distância intermediária entre seções de modo que as medidas não sejam nem tão correlacionadas, nem completamente descorrelacionadas. A figura 4.2 mostra dois exemplos de flutuações dos diâmetros de fibras obtidos segundo esse modelo.

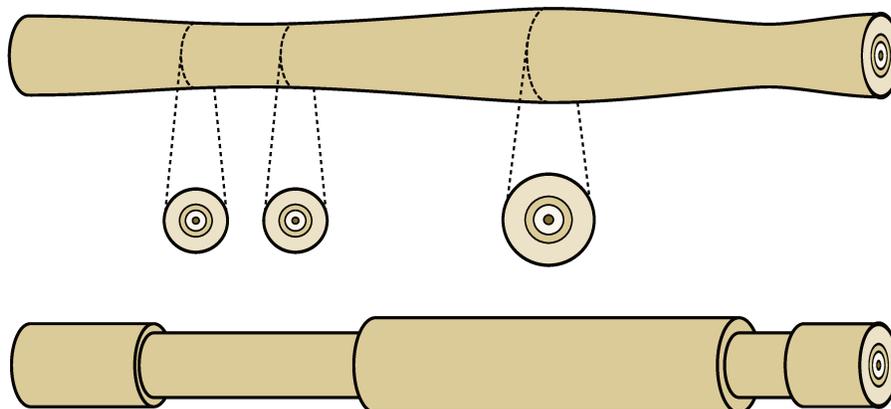


Figura 4.1: Ilustração da idéia de comprimento de relação (L_c): seções próximas de uma dada fibra são provavelmente mais semelhantes que seções separadas por uma distância maior. O comprimento de correlação traduz essa escala de distâncias.

Os valores utilizados para as realizações das variáveis aleatórias foram obtidos segundo as se-

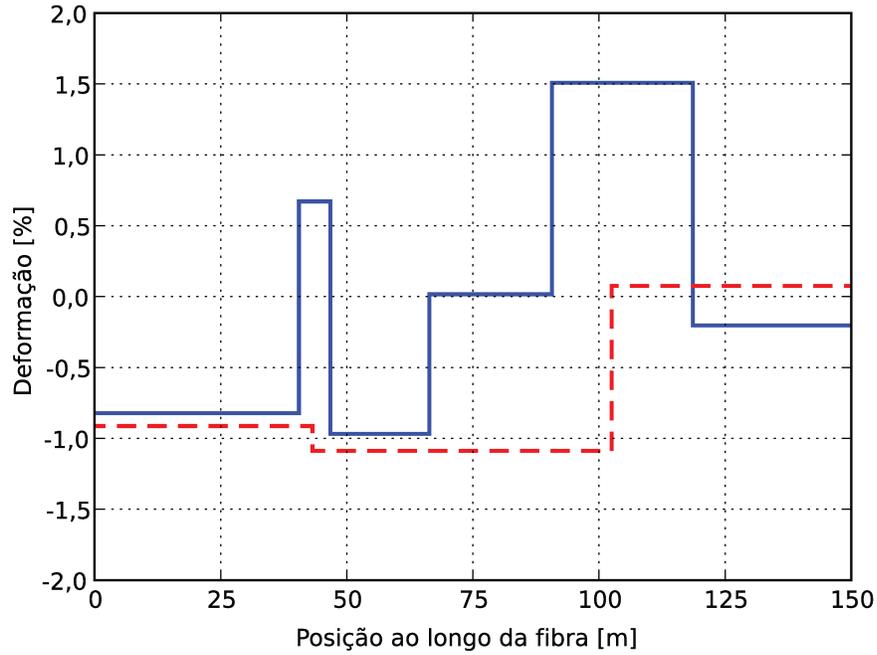


Figura 4.2: Exemplos de flutuação dos diâmetros da fibra segundo o modelo adotado. Os parâmetros utilizados foram desvio padrão de 1% e comprimento de correlação 50 m para uma fibra de 150 m de comprimento.

guintes expressões:

$$d_i = \sigma_R N(0;1) \quad (4.36)$$

$$l_i = -L_c \ln(U(0;1)) \quad (4.37)$$

onde d_i é a deformação dos diâmetros da i -ésima seção da fibra, cujo comprimento é dado por l_i , e $N(0;1)$ e $U(0;1)$ são funções geradoras de números aleatórios de distribuições respectivamente normal (média 0 e desvio 1) e uniforme (no intervalo de 0 a 1).

O valor da deformação de cada seção da fibra é usado para determinarmos sua curva de dispersão. Por simplicidade, calculamos de antemão essas curvas para a fibra sem deformação, com 1% de compressão e com 1% de expansão de seu diâmetro. Utilizamos então interpolação e extrapolação lineares para determinarmos a curva para uma deformação qualquer d_i .

Finalmente, de posse dos parâmetros de dispersão e comprimento de cada seção da fibra, podemos aplicar qualquer dos métodos de solução de ganho paramétrico descritos nas seções 4.1 e 4.2,

bastando escolher as frequências e potências dos bombeios.

4.4 Implementação

Primeiramente é importante fazermos uma observação sobre o cálculo do coeficiente não-linear da fibra γ . Como evidenciado em (4.13), ele é dependente da área efetiva do modo e da frequência angular do sinal, sendo, contudo, aproximado para um valor constante. O cálculo desse valor foi feito utilizando-se a frequência e a área efetiva do modo central da banda desejada, uma vez que a frequência central exata é determinada somente após a definição da posição dos bombeios, o que é feito posteriormente. Os valores calculados de γ para cada uma das fibras apresentadas no capítulo 3 encontram-se na tabela 4.1.

Para comparar os desempenhos dos perfis de fibras escolhidos implementamos um método para sintonizar os bombeios no espectro de forma a maximizar a largura de banda B dos FOPAs mantendo seu ganho G plano e em um nível aceitável. O método consiste em aumentarmos iterativamente a diferença de frequência entre os bombeios, buscando simultaneamente e com refinamento cada vez maior a frequência central do FOPA que minimiza o seu *ripple*. Buscamos sempre que possível manter o ganho paramétrico em níveis acima de 20 dB e o valor máximo do *ripple* menor que ± 1 dB.

Com relação à pureza espectral dos sinais utilizados, apontamos que as fontes empregadas foram ideais, ou seja, com larguras de linha desprezíveis. Essa hipótese não afeta os resultados obtidos, pois mesmo que considerássemos larguras de ordem de megahertz, a escala de tempo em que seus efeitos seriam notados é muito maior que a janela temporal da simulação (da ordem de 100 ps).

Definido o método de sintonização dos bombeios em cada fibra, resta ainda escolhermos o comprimento L de cada uma. Neste caso, o critério empregado é o de utilizar para cada fibra o comprimento que resulta em uma amplificação de 35 dB na ausência de flutuações. Os comprimentos assim definidos podem também ser vistos na tabela 4.1.

Quanto à potência dos bombeios, utilizamos 3,5 W para cada um. Apontamos que os resultados mostrados nesse capítulo são válidos para esse valor de potência, pois, apesar de ser possível

diminuir-se a potência e aumentar o comprimento da fibra de modo a manter-se o ganho constante, isso geralmente implica em uma redução da largura de banda do FOPA. Essa questão é exemplificada no apêndice B.

4.5 Resultados Numéricos

Apresentamos a seguir os resultados obtidos na realização dos FOPAs divididos em três seções. Na primeira avaliamos, para cada fibra, as diferenças nas curvas de amplificação obtidas através do modelo de quatro ondas e do SSFM. A seguir introduzimos deformações de $\pm 1\%$ e $\pm 0,25\%$ em toda a extensão das fibras (sem flutuações) para verificarmos as variações nos perfis de ganho assim geradas. Este segundo valor de deformação foi escolhido porque, segundo fabricantes de fibras, é possível diminuir em quatro ou cinco vezes o desvio padrão de 1% utilizando-se técnicas especiais disponíveis atualmente. Por fim a terceira seção apresenta os resultados encontrados ao introduzirmos o modelo completo de flutuações nas fibras e variarmos tanto a intensidade de σ_R quanto o comprimentos de correlação L_c , independentemente.

4.5.1 Fibras Ideais

Primeiramente realizamos os amplificadores paramétricos com cada fibra utilizando suas curvas de dispersão ideais (sem deformação) por meio do modelo de quatro ondas. As larguras de banda obtidas estão dispostas na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Especificação dos FOPAs realizados com cada fibra sem deformação por meio do modelo de quatro ondas.

Fibra	γ [$W^{-1}km^{-1}$]	L [m]	B [nm]
\mathcal{F}_1	9,04	95	98,4
\mathcal{F}_2	8,84	78	262,2
\mathcal{F}_3	4,41	180	202,4
\mathcal{F}_4	3,10	221	214,2

Estes dados nos mostram que a fibra \mathcal{F}_1 tem banda claramente menor que as demais. A razão para isso é principalmente devida ao seu coeficiente de dispersão de quarta ordem não ser o mais apropriado para um FOPA, como discutido na seção 3.3.

Quanto às demais, embora todas abranjam faixas largas de comprimentos de onda, é indiscutível a superioridade de \mathcal{F}_2 em relação às fibras projetadas, apresentando banda quase 30% maior que \mathcal{F}_3 , por exemplo. Isso se deve ao fato de sua baixa dispersão permitir que haja casamento de fases entre as componentes participantes da mistura a quatro ondas em uma banda mais larga. No entanto essa mesma característica aumenta a eficiência de outros efeitos não lineares, em especial a MI (instabilidade de modulação – *modulation instability*), que degrada o ganho paramétrico nas regiões próximas aos bombeios.

No contexto deste trabalho podemos interpretar MI como um processo de mistura a quatro ondas envolvendo apenas um bombeio de alta potência. Assim como na mistura a quatro ondas, o casamento de fases ocorre entre um sinal, seu escravo e o bombeio, que é considerado duas vezes, i.e., como duas componentes do espectro com frequências idênticas. Esse processo ocorre através da modulação própria de fase e interfere diretamente no ganho paramétrico ao redor dos bombeios. Uma estimativa para a essa banda de MI pode ser obtida através da expressão [24]:

$$\Delta\omega_i = \sqrt{\frac{2\gamma P_i}{|\beta_2(\omega_i)|}} \quad (4.38)$$

onde P_i e ω_i são a potência e a frequência angular do bombeio i .

Desta equação podemos concluir de imediato que a fibra \mathcal{F}_2 terá a maior diminuição de banda de amplificação, pois tem uma curva de dispersão de segunda ordem muito baixa. Realizando um cálculo aproximado, a redução de banda da fibra \mathcal{F}_2 deve ser por volta de 90 nm, que representa mais de um terço de sua banda total. Adicionalmente, as fibras \mathcal{F}_3 e \mathcal{F}_4 serão as menos afetadas, com reduções da ordem de apenas 3 nm, enquanto que para fibra \mathcal{F}_1 esse valor deve ser aproximadamente 13 nm, como mostrado na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Correção das larguras de banda dos FOPAs pela a inclusão dos efeitos de MI – equação 4.38.

Fibra	B [nm]	B _{MI} [nm]
\mathcal{F}_1	98,4	85
\mathcal{F}_2	262,2	172
\mathcal{F}_3	202,4	199
\mathcal{F}_4	214,2	211

Através desses resultados podemos concluir que, apesar de ser desejável que a fibra utilizada

em amplificação paramétrica tenha coeficientes de dispersão de ordem par baixos em λ_0 , sua dispersão deve ser alta ao redor dos bombeios para evitar o efeito de MI. Assim, outra característica recomendável para tais fibras é que seu coeficiente de dispersão de terceira ordem (ou mesmo outra ordem ímpar) seja grande em λ_0 , pois isso aumenta o valor da dispersão na região dos bombeios:

$$\beta_2(\omega_i) \approx \beta_2(\omega_0) + (\omega_i - \omega_0)\beta_3(\omega_0) \quad (4.39)$$

Essa característica também deve auxiliar na redução de interferência entre canais provocadas também por efeitos não-lineares indesejados, pois inibe o casamento de fase entre canais.

Para validar os resultados apresentados na tabela 4.2 utilizamos o SSFM para resolver as fibras sem deformações e observar o impacto do MI no ganho paramétrico, uma vez que esse efeito não aparece no modelo de quatro ondas. As figuras 4.3 a 4.6 mostram comparações dos perfis de ganho das fibras ideais obtidos através dos dois métodos. Observamos que as frequências dos bombeios e tamanhos das fibras foram selecionados a partir do modelo de quatro ondas, de modo que podem não ser exatamente os valores ótimos para o SSFM.

Na figura 4.3 vemos os bombeios sintonizados em 1443,32 nm e 1563,32 nm. As diferenças entre as curvas de ganho obtidas através de cada método encontram-se ao redor dos bombeios, onde o SSFM mostra os vales de amplificação introduzidos pelos efeitos de MI.

Podemos ver na figura 4.4 como é deletério o efeito de MI na fibra \mathcal{F}_2 , que apresenta o menor valor de $\beta_3(\omega_0)$ dentre as fibras utilizadas. A banda segundo o SSFM é aproximadamente 30% menor que a obtida através do modelo de quatro ondas. Neste caso os bombeios estão em 1501,50 nm e 1799,50 nm.

Assim como para \mathcal{F}_1 , ambos os modelos produzem curvas de ganho muito parecidas para \mathcal{F}_3 . Vemos na figura 4.5 que os efeitos de MI ao redor dos bombeios (1399,86 nm e 1619,86 nm) são ainda menores que para a primeira fibra apresentada.

No caso de \mathcal{F}_4 , apesar de observarmos o mesmo efeito reduzido de MI de \mathcal{F}_3 , vemos na figura 4.6 que o ganho obtido pelo SSFM não atinge o mesmo patamar do obtido pelo modelo de quatro ondas. Isso é devido à otimização da sintonização dos bombeios e tamanhos das fibras para o modelo de quatro ondas, e não para o SSFM. Os bombeios estão em 1343,62 nm e 1581,62 nm.

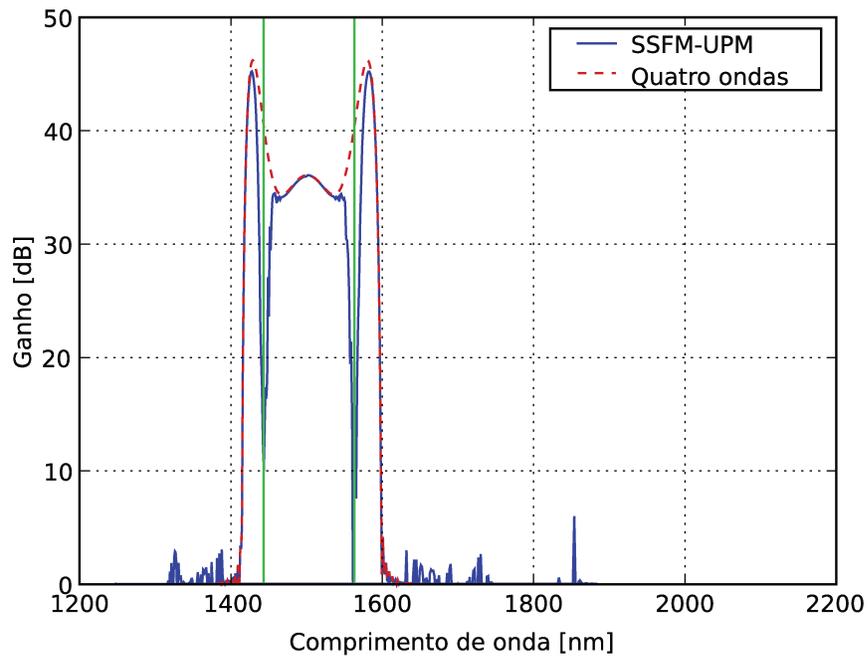


Figura 4.3: Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_1 obtidos pela matriz de transferência do modelo de quatro ondas e pelo SSFM (bombeios indicados pelos traços verticais).

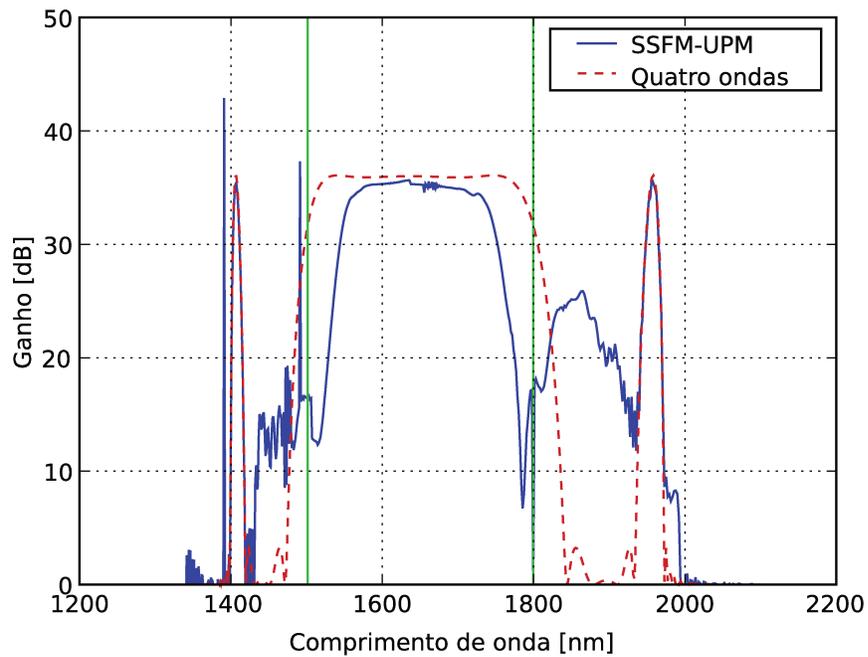


Figura 4.4: Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_2 obtidos pela matriz de transferência do modelo de quatro ondas e pelo SSFM (bombeios indicados pelos traços verticais).

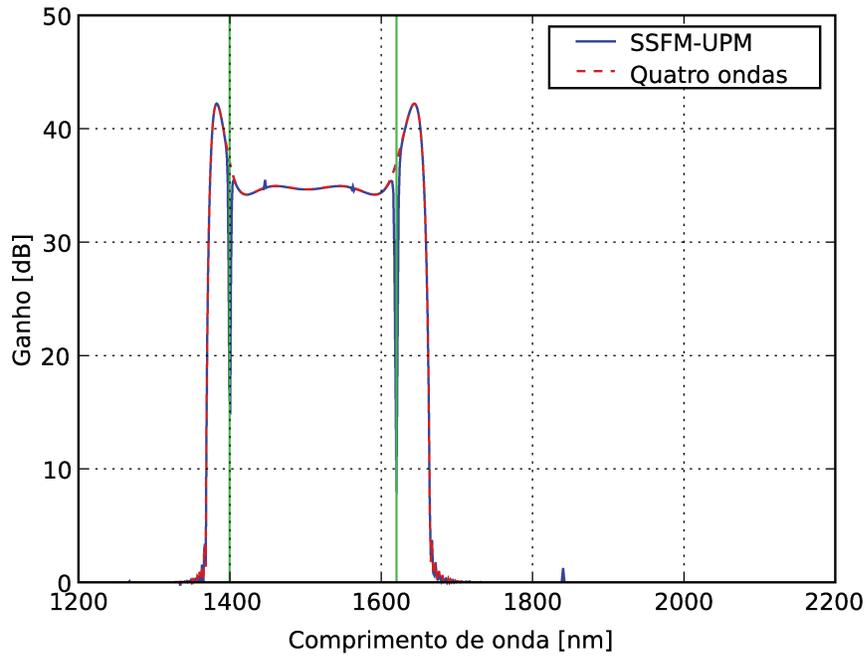


Figura 4.5: Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_3 obtidos pela matriz de transferência do modelo de quatro ondas e pelo SSFM (bombeios indicados pelos traços verticais).

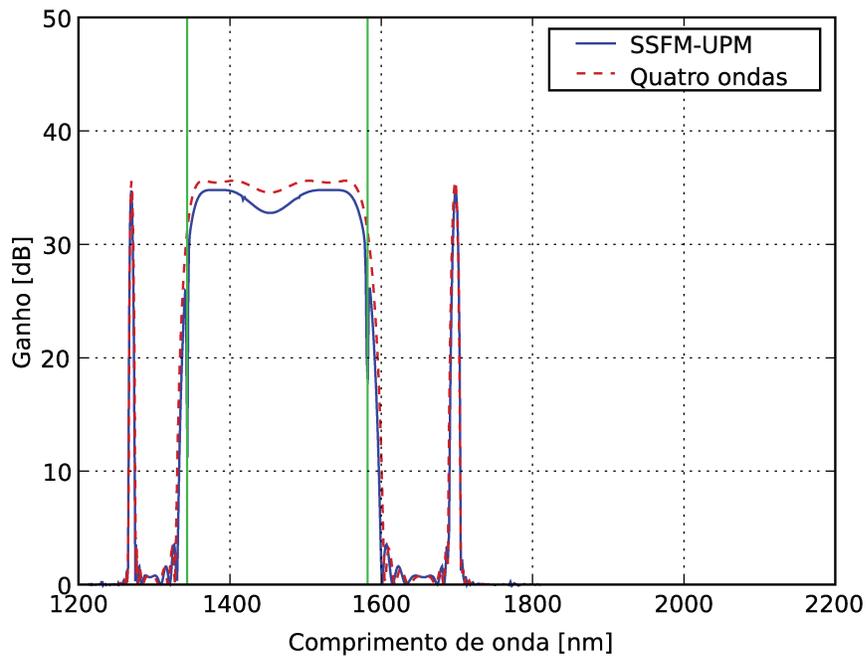


Figura 4.6: Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_4 obtido pela matriz de transferência do modelo de quatro ondas e pelo SSFM (bombeios indicados pelos traços verticais).

Estes resultados comprovam que, com exceção da fibra \mathcal{F}_2 , o modelo de quatro ondas é preciso o suficiente para ser utilizado em nossas simulações numéricas e permitir uma comparação adequada entre as fibras.

4.5.2 Fibras Deformadas sem Flutuação

Antes de inserirmos as flutuações de diâmetro ao longo das fibras fizemos uma comparação dos perfis de ganho das fibras ideais com os das fibras deformadas em $\pm 1\%$ e $\pm 0,25\%$ em toda sua extensão utilizando o modelo de quatro ondas. Os resultados dessa análise estão representados nas figuras 4.7 a 4.14.

Na figura 4.7 observamos que a deformação de $\pm 0,25\%$ dos diâmetros de \mathcal{F}_1 provoca uma pequena variação nas frequências ótimas de bombeio e banda de amplificação dos FOPAS. Contudo, o ganho é sempre mantido acima de 30 dB. Com o aumento da deformação para $\pm 1\%$ (figura 4.8), a variação nas frequências de bombeio também aumenta. Já a banda continua relativamente constante, embora sua posição varie aproximadamente 50 nm.

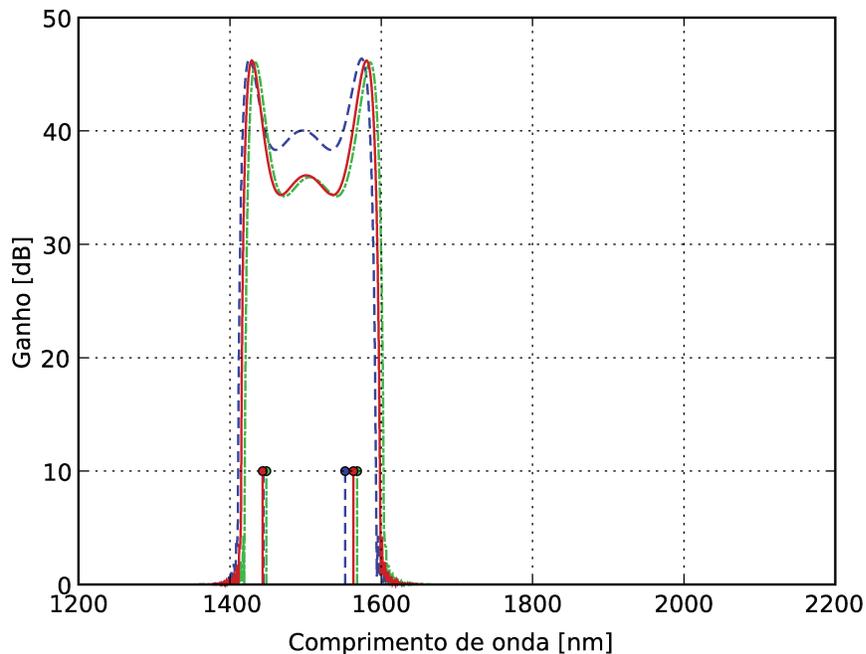


Figura 4.7: Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_1 original (vermelho) e com diâmetro 0,25% maior (tracejada) e 0,25% menor (traço-ponto) em toda sua extensão obtidos através do modelo de quatro ondas (bombeios indicados pelos traços verticais).

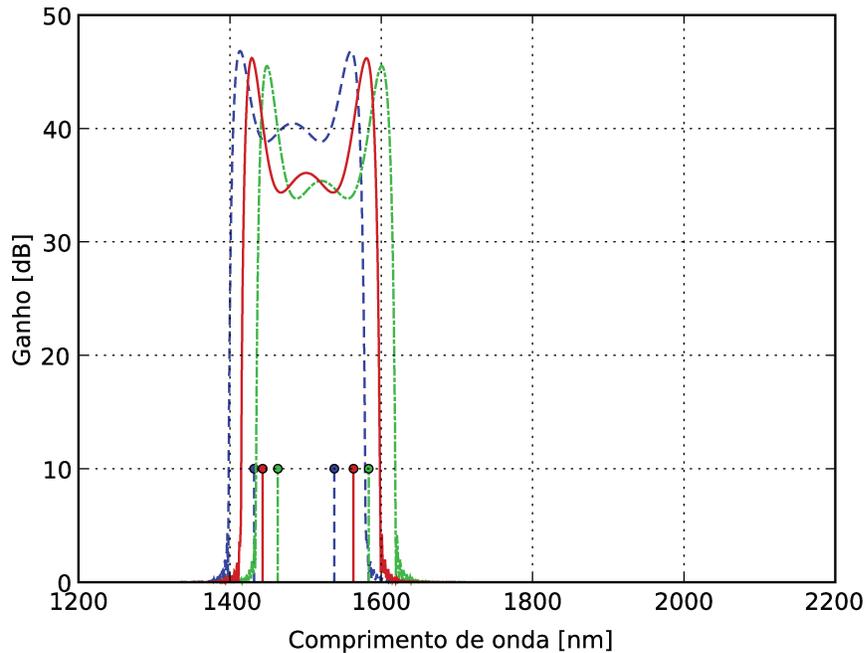


Figura 4.8: Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_1 original (linha contínua) e com diâmetro 1% maior (tracejada) e 1% menor (traço-ponto) em toda sua extensão obtidos através do modelo de quatro ondas (bombeios indicados pelos traços verticais).

Os efeitos em \mathcal{F}_2 são claramente muito mais acentuados. Na figura 4.9 observamos que uma variação de $\pm 0,25\%$ resulta em uma variação da frequência dos bombeios em mais de 400 nm, o que se reflete também na frequência central da banda de amplificação e, conseqüentemente, na largura de banda. Como mostra a figura 4.10, esses efeitos são ainda mais intensos para as deformações de $\pm 1\%$. Neste caso as bandas de amplificação não se sobrepõem em frequência alguma, o que é uma característica indesejável para eventual produção em larga escala, já que cada amplificador fabricado operaria em uma banda diferente.

A fibra \mathcal{F}_3 apresenta a maior robustez dentre as quatro consideradas com relação às deformações em toda a extensão da fibra. Vemos na figura 4.11 que as deformações de $\pm 0,25\%$ têm impacto mínimo no perfil de amplificação da fibra, alterando apenas seu patamar de ganho. A figura 4.12 mostra que esse impacto ainda é pequeno mesmo para as deformações maiores, de $\pm 1\%$. Apenas os bombeios de frequência menor sofrem alteração maior de sintonia.

Apesar de também muito robusta, a fibra \mathcal{F}_4 apresenta variações de largura de banda um pouco maiores que \mathcal{F}_3 para ambas as deformações de $\pm 0,25\%$ (figura 4.13) e $\pm 1,00\%$ (figura 4.14). Neste

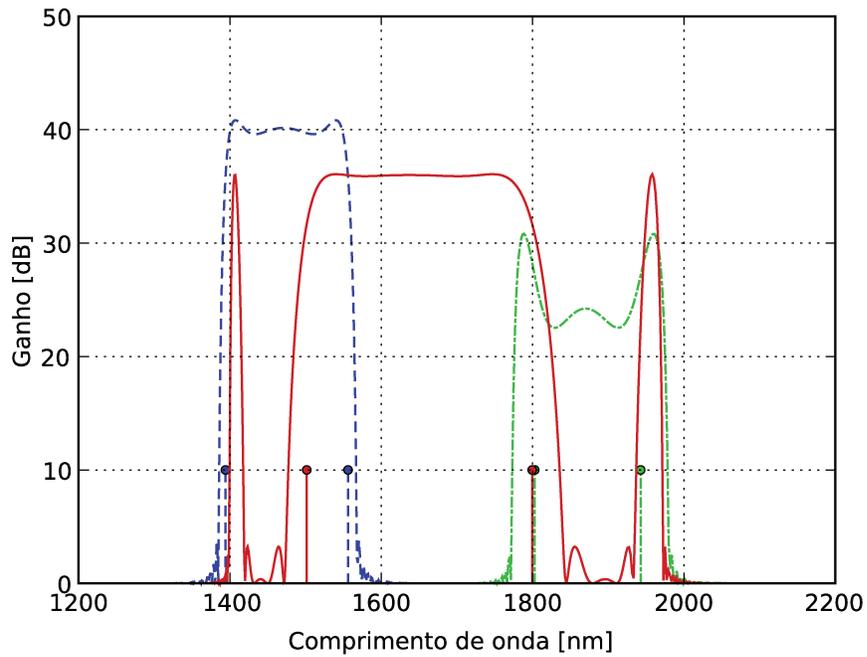


Figura 4.9: Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_2 original (linha contínua) e com diâmetro 0,25% maior (tracejada) e 0,25% menor (traço-ponto) em toda sua extensão obtidos através do modelo de quatro ondas (bombesios indicados pelos traços verticais).

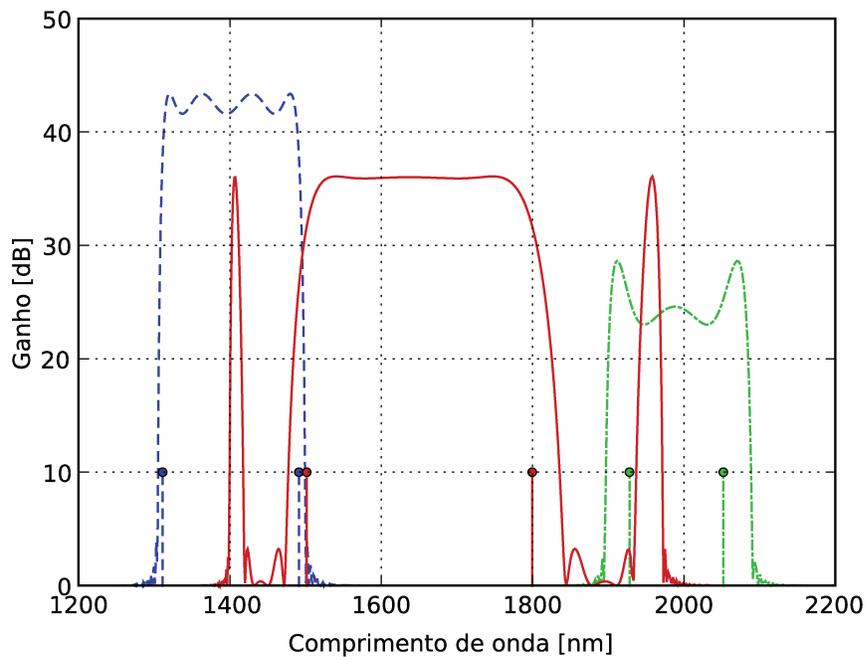


Figura 4.10: Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_2 original (linha contínua) e com diâmetro 1% maior (tracejada) e 1% menor (traço-ponto) em toda sua extensão obtidos através do modelo de quatro ondas (bombesios indicados pelos traços verticais).

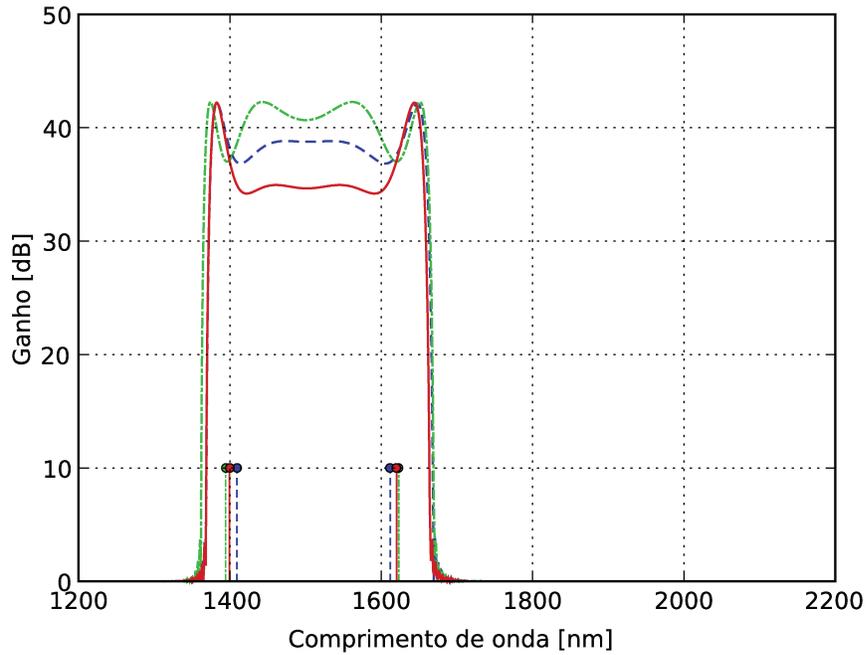


Figura 4.11: Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_3 original (linha contínua) e com diâmetro 0,25% maior (tracejada) e 0,25% menor (traço-ponto) em toda sua extensão obtidos através do modelo de quatro ondas (bombeios indicados pelos traços verticais).

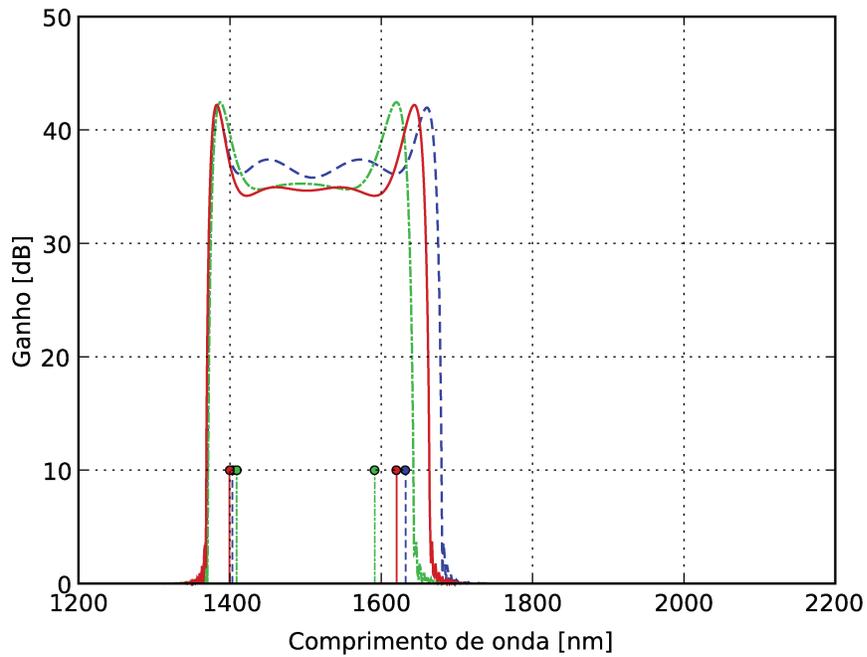


Figura 4.12: Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_3 original (linha contínua) e com diâmetro 1% maior (tracejada) e 1% menor (traço-ponto) em toda sua extensão obtidos através do modelo de quatro ondas (bombeios indicados pelos traços verticais).

último caso vemos ainda um decaimento do ganho para um pouco abaixo de 30 dB. Por outro lado, a frequência central de amplificação praticamente não sofre alteração.

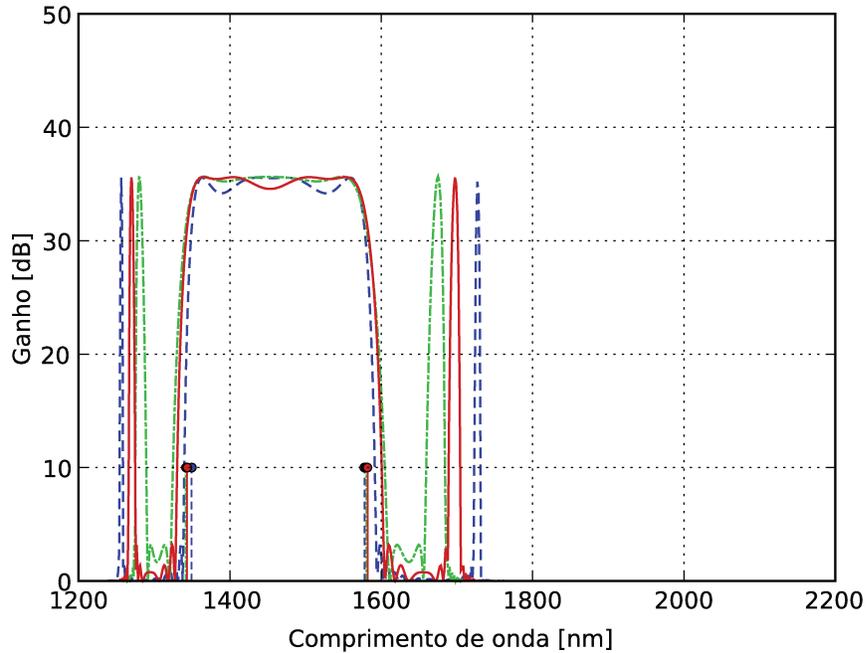


Figura 4.13: Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_4 original (linha contínua) e com diâmetro 0,25% maior (tracejada) e 0,25% menor (traço-ponto) em toda sua extensão obtidos através do modelo de quatro ondas (bombeios indicados pelos traços verticais).

Comparando esses gráficos podemos verificar com clareza a evolução em robustez representada pelas fibras \mathcal{F}_3 e \mathcal{F}_4 em relação às demais. A variação do centro e da largura banda dos FOPAs realizados com essas fibras é sensivelmente menor que para os realizados com \mathcal{F}_1 ou \mathcal{F}_2 . Quanto aos valores de ganho, observamos que, embora haja variação em todos os casos, é sempre possível mantê-lo acima de 20 dB, que é o valor considerado limite para os FOPAs gerados.

4.5.3 Modelo Completo

Visando fazer uma análise um pouco mais realista dos FOPAs com as fibras projetadas, incluímos agora o modelo de flutuações apresentado na seção 4.3. A avaliação de cada fibra foi feita em função dos dois parâmetros disponíveis neste modelo: o desvio padrão do diâmetro da fibra σ_R e o comprimento de correlação das flutuações L_c .

Estudamos valores de σ_R até 1%, pois, como mencionado, esse é o valor de desvio normalmente

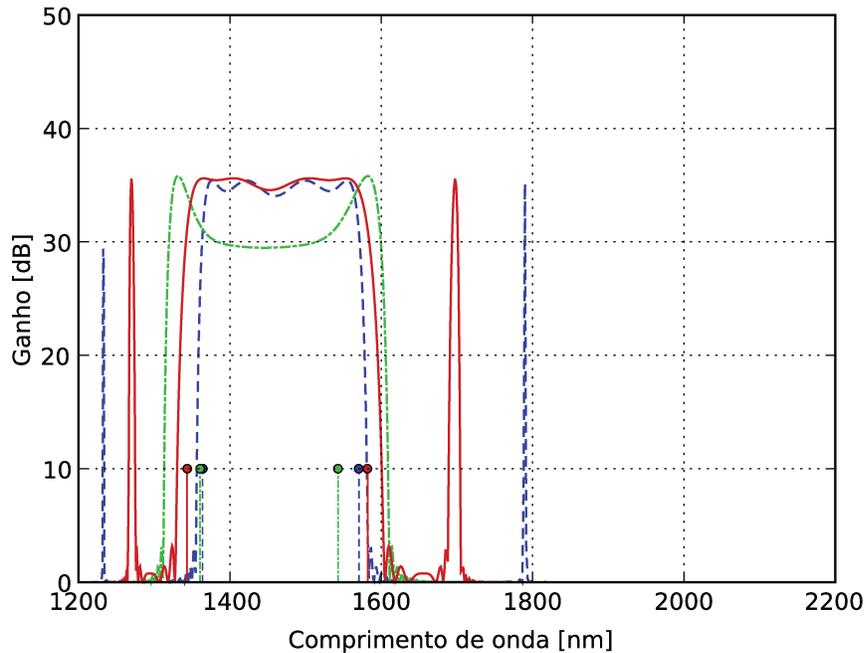


Figura 4.14: Perfis de ganho da fibra \mathcal{F}_4 original (linha contínua) e com diâmetro 1% maior (tracejada) e 1% menor (traço-ponto) em toda sua extensão obtidos através do modelo de quatro ondas (bombeios indicados pelos traços verticais).

encontrado nas folhas de especificação de fibras comercializadas. Quanto ao comprimento de correlação, há muita discussão a respeito desse valor na literatura [9], mas pouco consenso a seu respeito. Aceita-se que ele pode ser da ordem de metros a quilômetros, de modo que decidimos então testar valores entre 10 m e 1 km, pois dados os comprimentos das fibras que utilizamos (ver tabela 4.1), valores maiores produziram resultados muito próximos aos de 1 km.

As avaliações de cada par de parâmetros σ_R e L_c para cada fibra foi feita estocasticamente. Nos testes para medir os efeitos de σ_R utilizamos 50 realizações de cada fibra segundo o modelo de flutuações adotado e otimizamos as posições dos bombeios do FOPA para cada uma, coletando todos os dados de largura de banda, ganho e frequência central. Nos testes para medir os efeitos de L_c utilizamos 100 realizações de cada fibra. Esclarecemos que os geradores de números aleatórios foram iniciados sempre com as mesmas seqüências de sementes para todas as fibras e todos os valores de σ_R e L_c em cada análise.

Uma vez que a coleta de todos os dados requer a solução de um número muito grande de FOPAs até que a melhor posição de bombeio para cada realização seja obtida, não foi possível

utilizarmos o SSFM, somente o modelo de quatro ondas. Contudo, como já mostrado, ambos os métodos produzem resultados semelhantes para cada fibra, com exceção de \mathcal{F}_2 , de modo que ela não foi incluída nos testes subseqüentes.

Impacto da Deformação

Estudamos primeiramente o efeito do desvio padrão da deformação σ_R sobre o desempenho das fibras \mathcal{F}_1 , \mathcal{F}_3 e \mathcal{F}_4 . Definimos dois valores de comprimento de correlação relativo para realizarmos esse estudo: $0,1L$ e $0,25L$, onde L é o comprimento de cada fibra. Os comprimentos de correlação foram escolhidos relativos aos comprimentos de cada fibra porque estamos interessados por enquanto apenas no impacto de σ_R , que seria amplificado nas fibras mais longas caso o comprimento de correlação fosse o mesmo para todas as fibras. Mais adiante realizaremos a análise do comprimento de correlação absoluto, que é mais interessante do ponto de vista de fabricação.

Consideramos primeiramente como medida de desempenho dos FOPAs o produto da sua banda de amplificação pelo ganho dentro dessa banda. Os resultados dessa medição encontram-se nas figuras 4.15 e 4.16.

A figura 4.15 nos mostra que os desempenhos das três fibras decaem muito rapidamente com o aumento de σ_R , principalmente \mathcal{F}_3 e \mathcal{F}_4 , de modo que a fibra \mathcal{F}_1 pode ser considerada um pouco melhor para comprimentos de correlação baixos no caso das deformações ao longo da fibra serem pequenas (da ordem de 0,1%). Essa vantagem de \mathcal{F}_1 é, contudo, discutível considerando-se na comparação os altos desvios de cada medição, mostrados nos subgráficos para três valores distintos de σ_R : 0,1%, 0,5% e 0,9%. A partir de 0,2% as três fibras ficam muito parecidas e nenhuma apresenta desempenho aceitável para um FOPA que pretende competir com os EDFAs comerciais.

Com o aumento do comprimento de correlação para $0,25L$ (figura 4.16) a situação muda bastante. Embora ainda haja uma redução de desempenho com o aumento de σ_R até 0,2%, a partir desse valor os FOPAs apresentam desempenho satisfatório e constante. Além disso, as fibras \mathcal{F}_3 e \mathcal{F}_4 demonstram superioridade em relação à fibra \mathcal{F}_1 , mesmo considerando-se os desvios padrão das medições, mostrados para três valores de σ_R nos subgráficos de barras.

Para complementar a figura 4.16 apresentamos os gráficos independentes de banda e ganho para as três fibras nas figuras 4.17 e 4.18. Observamos que apesar do produto ser menor para \mathcal{F}_1 ,

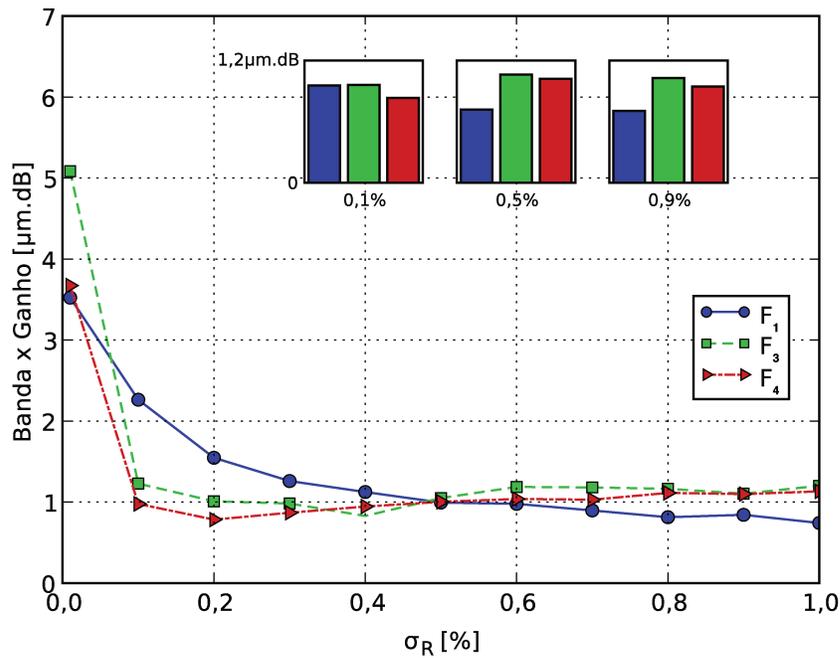


Figura 4.15: Produto banda por ganho em função de σ_R para comprimentos de correlação de $0,1L$. Os subgráficos mostram os desvios padrão das medições de cada fibra para três diferentes valores de σ_R .

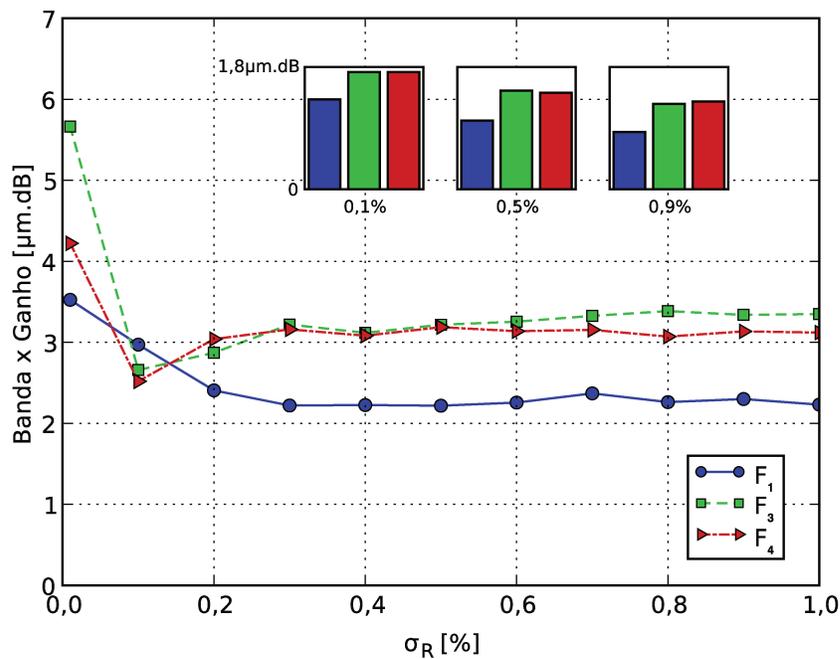


Figura 4.16: Produto banda por ganho em função de σ_R para comprimentos de correlação de $0,25L$. Os subgráficos mostram os desvios padrão das medições de cada fibra para três diferentes valores de σ_R .

seu ganho é maior que o das demais, sendo a única fibra a ficar acima de 20 dB em média. Já a fibra \mathcal{F}_4 tem o menor ganho, atingindo 15 dB em média para valores de σ_R acima de 0,4%. Mais uma vez, os desvios padrão de cada medida (mostrados nos subgráficos para três valores de σ_R) encontram-se em torno de 7 dB, o que reduz um pouco o impacto desses resultados.

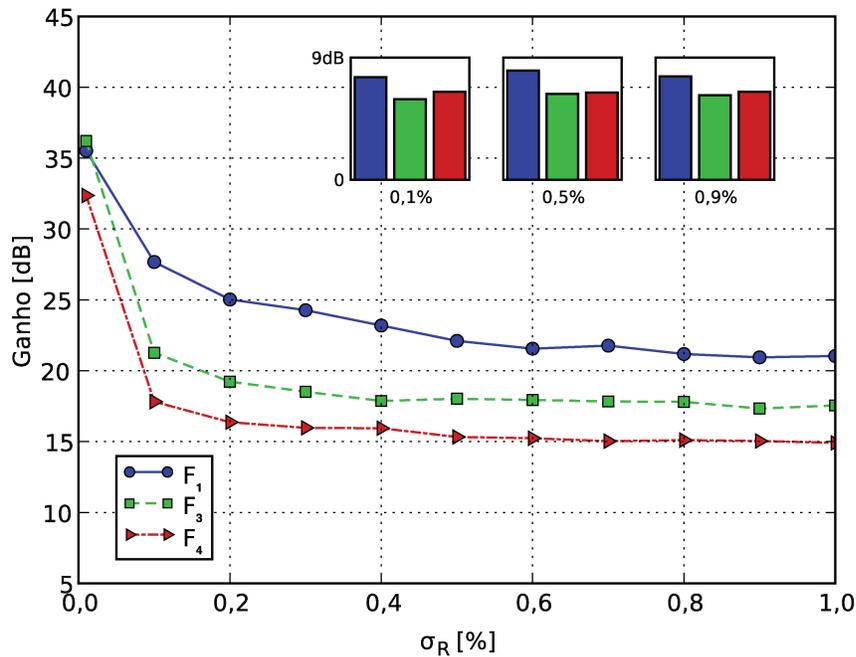


Figura 4.17: Ganho paramétrico em função de σ_R para comprimentos de correlação de 0,25L. Os subgráficos mostram os desvios padrão das medições de cada fibra para três diferentes valores de σ_R .

Por outro lado, a figura 4.18 mostra que \mathcal{F}_4 é a fibra a apresentar a maior banda (ao redor de 200 nm). Neste caso, mesmo considerando-se o desvio padrão provocado pelas flutuações, ela ainda encontra-se acima de \mathcal{F}_1 , que apresenta em média 100 nm de banda.

A segunda figura de mérito que analisamos é o desvio do comprimento de onda central σ_{λ_c} dos FOPAs. Esse valor é importante porque reflete a faixa de operação do amplificador. Por exemplo, no caso de fabricação em larga escala, é preciso garantir em que faixa de frequências trabalha o equipamento, e não apenas a largura de sua banda.

Apresentamos assim os dados coletados para as três fibras considerando comprimentos de correlação de 0,1L e 0,25L nas figuras 4.19 e 4.20, respectivamente. Ambos os gráficos mostram as mesmas tendências: a fibra \mathcal{F}_1 apresenta desvio muito maior que as demais, que são muito pare-

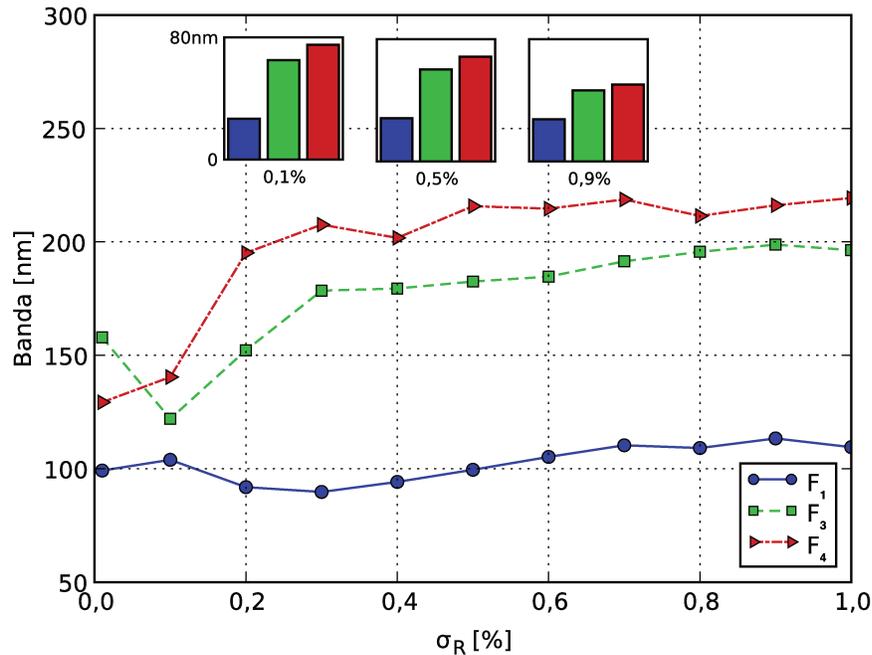


Figura 4.18: Banda de amplificação em função de σ_R para comprimentos de correlação de $0,25L$. Os subgráficos mostram os desvios padrão das medições de cada fibra para três diferentes valores de σ_R .

cidas. Esse resultado comprova que o desenvolvimento das fibras \mathcal{F}_3 e \mathcal{F}_4 realmente implicou em uma redução da variação de λ_c como consequência da redução da variação de λ_0 .

O comportamento linear das curvas já era esperado, pois utilizamos interpolação linear para aproximar as curvas de dispersão das fibras deformadas, como explicado na seção 4.3. Vale notar ainda que as fibras com comprimento de correlação relativo menor também apresentam desvios de λ_c menores, apesar de seu desempenho ser muito ruim nesse caso (figura 4.15).

Impacto do Comprimento de Correlação

Estudamos agora os efeitos provocados por diferentes comprimentos de correlação nas três fibras \mathcal{F}_1 , \mathcal{F}_3 e \mathcal{F}_4 . Adotamos para σ_R os valores $0,25\%$ e 1% , ambos compatíveis com técnicas de fabricação atuais.

Novamente começamos analisando o produto do ganho pela banda de amplificação paramétrica das fibras. Na figura 4.21 vemos essa figura de mérito em função do comprimento de correlação para desvios de 1% nos diâmetros das fibras. Observamos que para comprimento de correlação

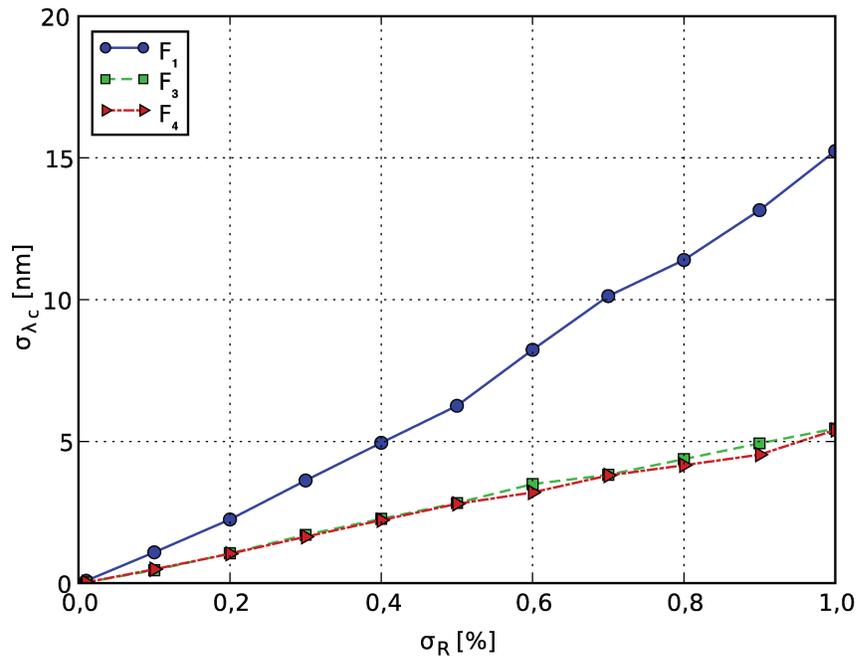


Figura 4.19: Desvio do centro da banda de amplificação dos FOPAs para as três fibras com comprimentos de correlação de 0,1L.

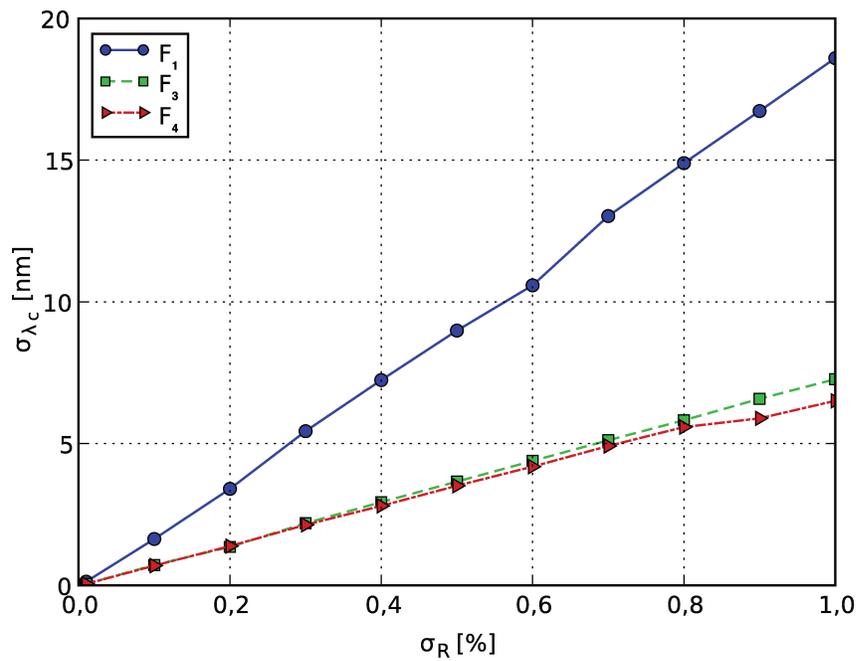


Figura 4.20: Desvio do centro da banda de amplificação dos FOPAs para as três fibras com comprimentos de correlação de 0,25L.

até 30 m ou 40 m, a fibra \mathcal{F}_1 situa-se acima das demais, mas a partir desse valor estas apresentam desempenho superior e muito parecido. Entretanto, ao levar-se em conta os desvios incluídos em cada medição – mostrados para três valores de comprimento de correlação nos subgráficos – as três fibras têm desempenhos semelhantes até 100 m.

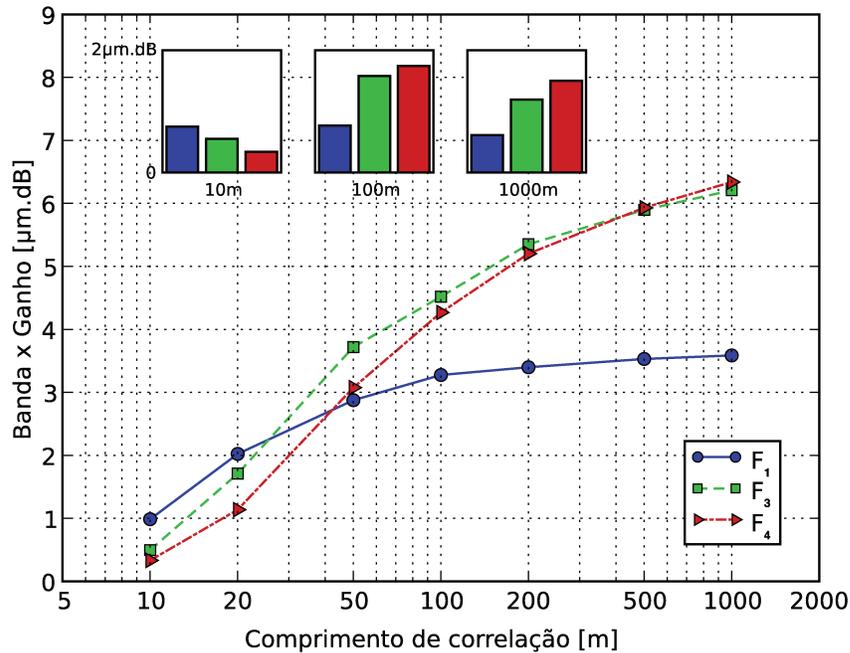


Figura 4.21: Produto largura de banda por ganho de cada fibra em função do comprimento de correlação para desvio de 1% do diâmetro. Os subgráficos mostram os desvios padrão das medições de cada fibra para três diferentes valores de L_c .

Um gráfico semelhante é obtido para desvios de 0,25% nos diâmetros das fibras (figura 4.22). A fibra \mathcal{F}_1 é mais robusta até 50 m de comprimento de correlação e a partir daí, mesmo com a inclusão dos desvios padrão, as fibras \mathcal{F}_3 e \mathcal{F}_4 apresentam melhor desempenho, com a segunda ainda um pouco superior à primeira.

Analisamos a seguir os gráficos de ganho de cada fibra. Na figura 4.23 representamos as curvas de ganho para desvios de deformação de 1%. Vê-se que \mathcal{F}_1 possui os melhores ganhos médios e que as demais fibras estão em um patamar um pouco abaixo, embora essa diferença torne-se menos relevante se considerarmos os desvios apresentados nos subgráficos.

As curvas para desvio de 0,25% encontram-se na figura 4.24, onde também se vêem as mesmas características apontadas anteriormente com relação às médias dos ganhos, embora sejam agora

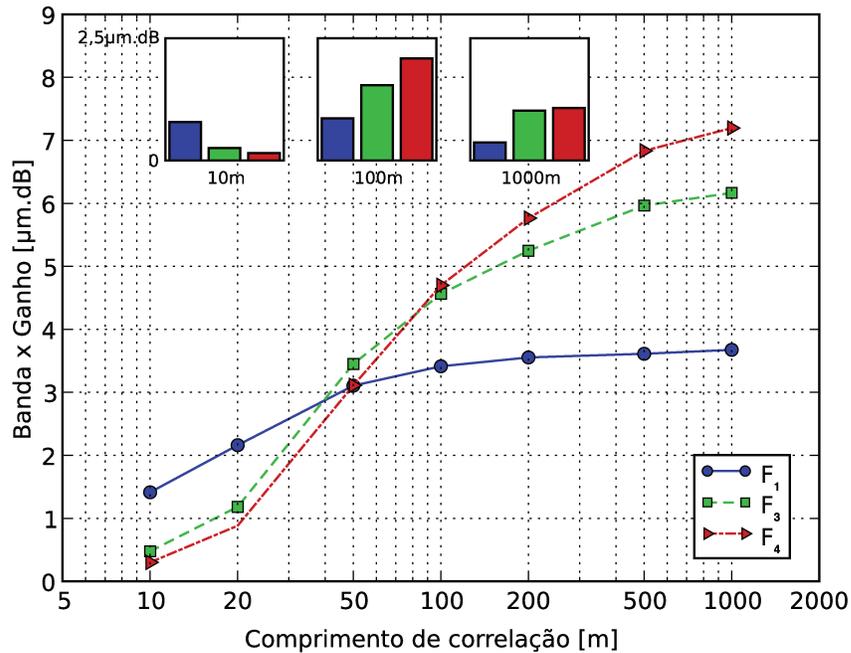


Figura 4.22: Produto largura de banda por ganho de cada fibra em função do comprimento de correlação para desvio de 0,25% do diâmetro. Os subgráficos mostram os desvios padrão das medições de cada fibra para três diferentes valores de L_c .

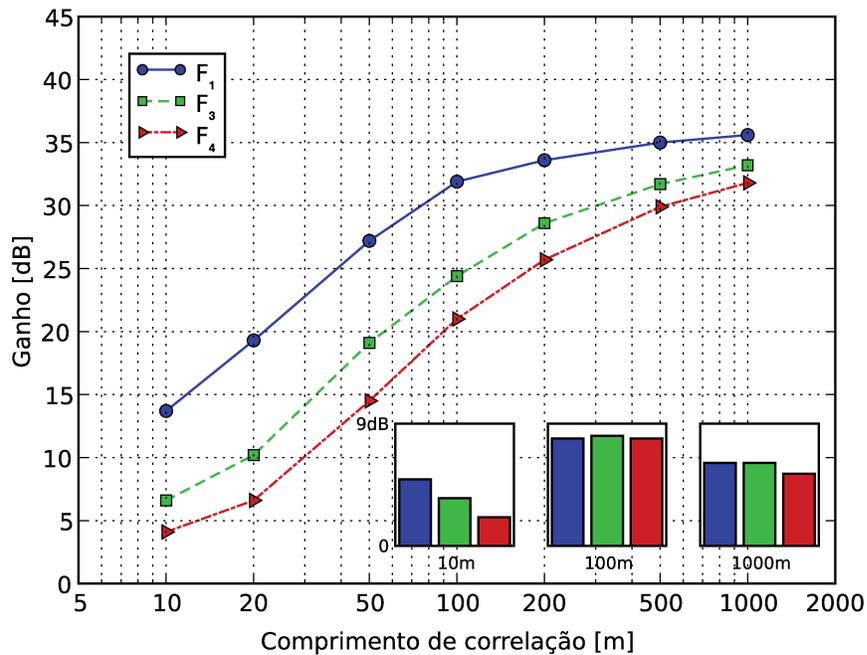


Figura 4.23: Ganho de cada fibra em função do comprimento de correlação para desvio de 1% do diâmetro (*ripple* máximo de ± 1 dB). Os subgráficos mostram os desvios padrão das medições de cada fibra para três diferentes valores de L_c .

levemente superiores aos ganhos obtidos anteriormente. De forma geral, se impusermos um mínimo de 15 dB a 20 dB de amplificação, vemos que a fibra \mathcal{F}_1 tem um requisito mais relaxado de comprimento de correlação mínimo: de 10 m a 20 m. Já as demais necessitam de 30 m a 50 m de comprimento de correlação para atingirem esse nível de ganho.

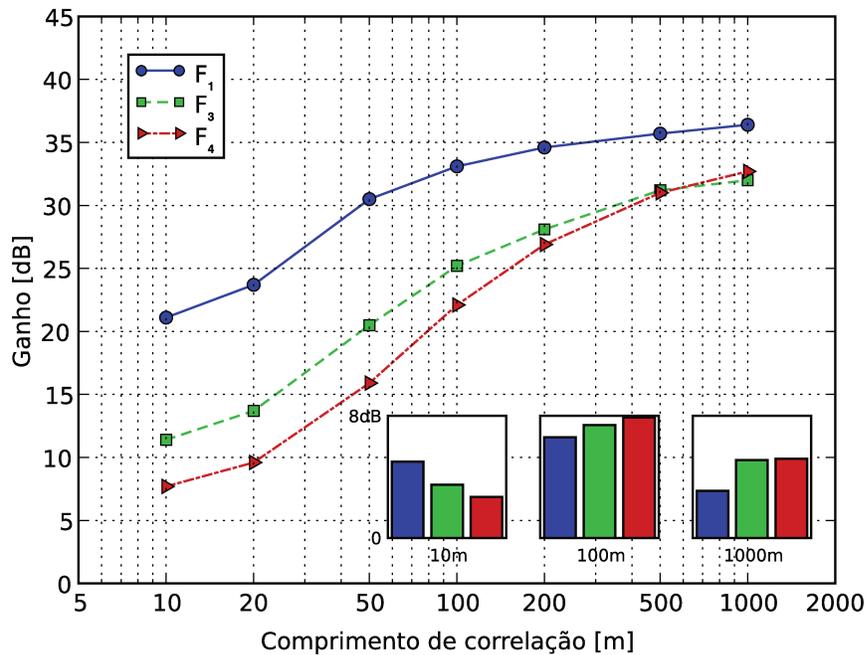


Figura 4.24: Ganho de cada fibra em função do comprimento de correlação para desvio de 0,25% do diâmetro (*ripple* máximo de ± 1 dB). Os subgráficos mostram os desvios padrão das medições de cada fibra para três diferentes valores de L_c .

É importante afirmarmos ainda que era esperado que as curvas de ganho ficassem próximas umas das outras, pois o critério utilizado na definição dos comprimentos de cada fibra foi exatamente padronizar os ganhos em 35 dB no caso de ausência de deformações. Concluímos daí que todas as diferenças com relação a esse valor mostradas nos gráficos de ganho são derivadas exclusivamente das flutuações aleatórias introduzidas.

A seguir, mostramos os gráficos de largura de banda dos FOPAs nas figuras 4.25 e 4.26 para desvios de 1% e 0,25% dos diâmetros das fibras, respectivamente. No primeiro, vemos o impacto na robustez das larguras de banda das fibras otimizadas já a partir de comprimentos de correlação de 20 m, onde os desvios-padrão das medições mostrados nos subgráficos ainda são relativamente altos. Para comprimentos maiores, onde esse desvio diminui consideravelmente, a superioridade

de robustez fica ainda mais clara.

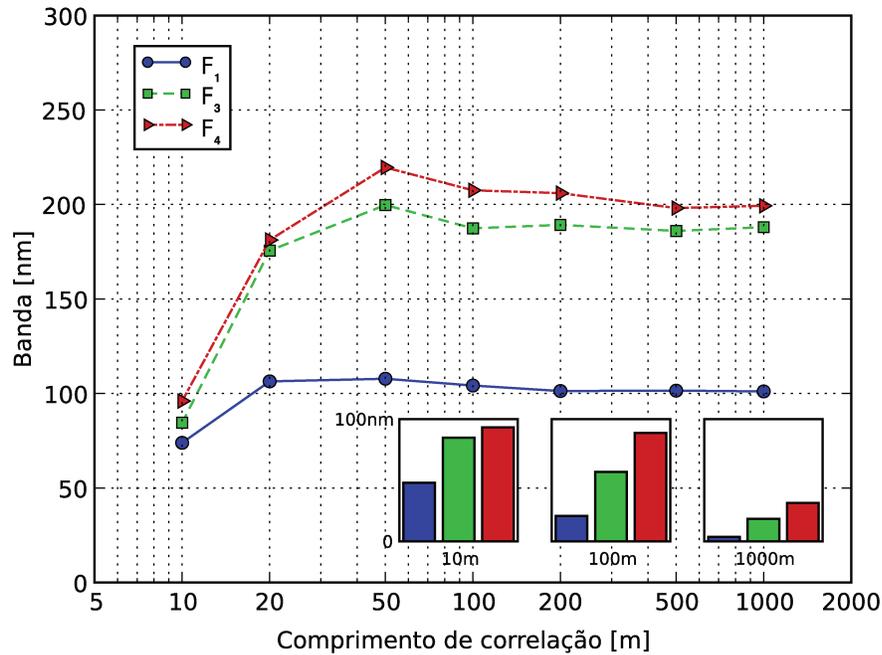


Figura 4.25: Largura de banda de cada fibra em função do comprimento de correlação para desvio de 1% do diâmetro (*ripple* máximo de ± 1 dB). Os subgráficos mostram os desvios padrão das medições de cada fibra para três diferentes valores de L_c .

Na figura 4.26 vemos que a mesma tendência se repete, porém para comprimentos de correlação a partir de 50 m, e não 20 m. Por outro lado, o patamar atingido pela fibra \mathcal{F}_4 é um pouco maior: por volta de 220 nm, enquanto as demais mantêm os mesmos patamares da figura 4.25: \mathcal{F}_1 atinge seu máximo ao redor de 100 nm, e \mathcal{F}_3 se aproximam de 200 nm de banda.

4.6 Considerações Finais

Considerando todos os resultados apresentados, acreditamos ter demonstrado a melhora de desempenho conseguida em amplificadores paramétricos a partir do método de otimização de perfis de fibras ópticas empregado. O método apresentado foi capaz de produzir uma fibra que propicia amplificação paramétrica com ganhos da ordem de 30 dB em uma banda de aproximadamente 200 nm mesmo em face de fortes deformações de seu diâmetro, que se refletem em uma variação de 14 nm em seu zero de dispersão.

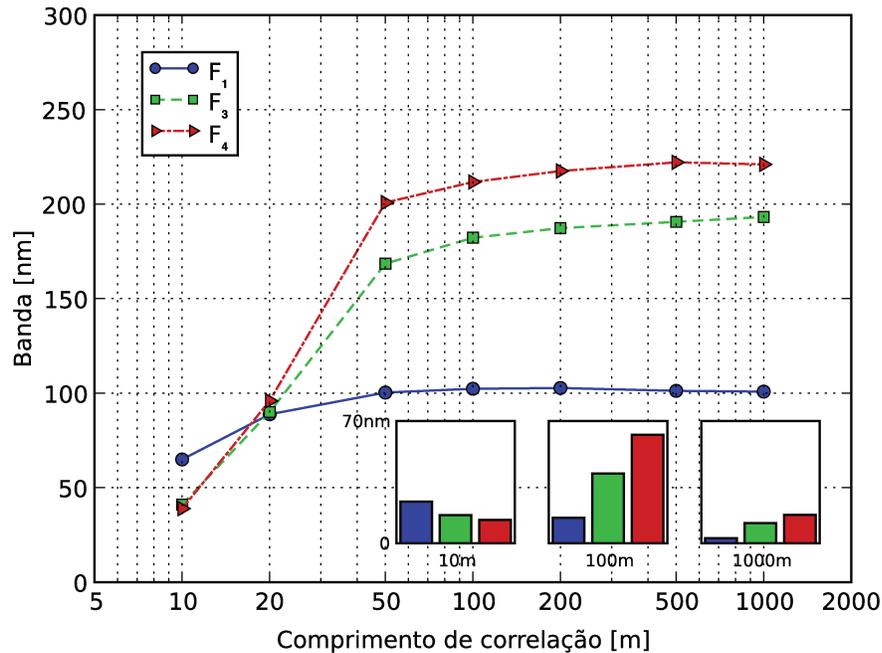


Figura 4.26: Largura de banda de cada fibra em função do comprimento de correlação para desvio de 0,25% do diâmetro (*ripple* máximo de ± 1 dB). Os subgráficos mostram os desvios padrão das medições de cada fibra para três diferentes valores de L_c .

Medindo-se experimentalmente a variação de λ_0 em alguns exemplares de fibras altamente não-lineares, é comum encontrarem-se valores da ordem de poucos nanômetros, de modo que ainda há a possibilidade de nosso modelo estar superestimado em relação ao processo de fabricação em si, ou seja, é possível que o desvio do diâmetro das fibras seja ainda menor que os $\pm 0,25\%$ considerados.

Ainda em relação ao processo de fabricação, fica claro que é desejável – senão imperativo – que o comprimento de correlação das deformações seja longo em comparação ao comprimento da fibra usada no amplificador, pois nenhuma das fibras estudadas mostrou ganho paramétrico satisfatório no caso de comprimentos de correlação muito baixos. Esse objetivo pode ser alcançado principalmente com a redução de vibrações de alta frequência no maquinário e com o aumento da velocidade de puxamento da fibra na torre.

Por fim, o desempenho demonstrado principalmente pela fibra \mathcal{F}_4 é encorajador em face da simplicidade de seu perfil de índices, que a princípio não apresenta nenhuma característica que impossibilite ou mesmo dificulte sua fabricação com a tecnologia atual. Desse modo, consideramos como decorrência natural deste trabalho a construção de alguns exemplares da fibra \mathcal{F}_4 (e possível-

mente \mathcal{F}_3) para um aprofundamento ainda maior do seu estudo e comparação com os resultados aqui apresentados.

Capítulo 5

Conclusões

A tecnologia de amplificação paramétrica uma possibilidade promissora para a nova geração de amplificadores no mercado de telecomunicações. No entanto, a fabricação desses dispositivos em larga escala ainda está fora de alcance, devido à pouca robustez neles observada em laboratório.

Este trabalho apresentou dois novos perfis de fibras ópticas otimizadas para a construção de FOPAs robustos a um tipo de deformação geométrica. Os perfis foram otimizados indiretamente através de um algoritmo genético que buscou a geometria da fibra que propiciasse os melhores parâmetros de dispersão para a geração de FOPAs, além de avaliar a robustez desses parâmetros em relação à deformações.

A avaliação da robustez foi feita com base em um modelo aleatório para as deformações na geometria das fibras ao longo de sua extensão. Esse modelo foi inspirado no tipo de deformações causadas nas fibras em seu processo de fabricação. Os resultados das simulações executadas com cada perfil em comparação com perfis de fibra utilizados convencionalmente na geração de FOPAs demonstrou a evolução de robustez das fibras propostas.

Os dados gerados também demonstraram que, de modo geral, os amplificadores paramétricos são mais sensíveis à flutuações rápidas em sua geometria ao longo de sua extensão que a flutuações mais lentas. A intensidade dessas deformações não parece ter um efeito muito acentuado dentro dos limites encontrados hoje nos processos de fabricação padrão.

5.1 Trabalhos futuros

Trabalhos derivados deste estudo incluem principalmente a fabricação dos perfis propostos para a comparação dos resultados das simulações com amplificadores experimentais em laboratório.

Outras ramificações são a inclusão de modelos mais complexos de solução para a mistura a quatro ondas, que incluam efeitos de birrefringência dispersão de modo de polarização, e a análise do efeito de outros tipos de deformações geométricas.

Referências Bibliográficas

- [1] Y. B. Lu, P. Chu, A. Alphones, e P. Shum, "A 105-nm ultrawide-band gain-flattened amplifier combining c- and l-band dual-core EDFAs in a parallel configuration," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 16, no. 7, pp. 1640–1642, 2004.
- [2] E. B. Desurvire, "Capacity demand and technology challenges for lightwave systems in the next two decades," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 12, pp. 4697–4710, Dez. 2006.
- [3] J. Hansryd e P. A. Andrekson, "Broad-band continuous-wave-pumped fiber optical parametric amplifier with 49-dB gain and wavelength-conversion efficiency," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 13, no. 3, pp. 194–196, 2001.
- [4] P. Dainese, G. S. Wiederhecker, A. A. Rieznik, H. L. Fragnito, e H. E. Hernandez-Figueroa, "Designing fiber dispersion for broadband parametric amplifiers," in *2005 SBMO/IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics*, Jul. 2005, pp. 92–95.
- [5] L. Provino, A. Mussot, E. Lantz, T. Sylvestre, e H. Maillotte, "Broadband and flat parametric amplifiers with a multisection dispersion-tailored nonlinear fiber arrangement," *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 20, no. 7, pp. 1532–1537, Jul. 2003.
- [6] M. E. Marhic, Y. Park, F. S. Yang, e L. G. Kazovsky, "Broadband fiber-optical parametric amplifiers and wavelength converters with low-ripple chebyshev gain spectra," *Optics Letters*, vol. 21, pp. 1354–1356, Set. 1996.
- [7] M. Gao, C. Jiang, W. Hu, e J. Wang, "Optimized design of two-pump fiber optical parametric amplifier with two-section nonlinear fibers using genetic algorithm," *Optics Express*, vol. 12, no. 23, pp. 5603–5613, 2004.
- [8] J. M. C. Boggio, J. D. Marconi, S. R. Bickham, e H. L. Fragnito, "Spectrally flat and broadband double-pumped fiber optical parametric amplifiers," *Optics Express*, vol. 15, no. 9, pp. 5288–5309, 2007.
- [9] M. Karlsson, "Four-wave mixing in fibers with randomly varying zero-dispersion wavelength," *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 15, no. 8, pp. 2269–2275, 1998.
- [10] M. Farahmand e M. de Sterke, "Parametric amplification in presence of dispersion fluctuations," *Optics Express*, vol. 12, no. 1, pp. 136–142, 2004.
- [11] F. Yaman, Q. Lin, S. Radic, e G. P. Agrawal, "Impact of dispersion fluctuations on dual-pump fiber-optic parametric amplifiers," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 16, no. 5, pp. 1292–1294, 2004.

- [12] K. Wong e N. Wong, "Robust gain bandwidth optimization in two-pump fiber optical parametric amplifiers with dispersion fluctuations," in *Intelligent Signal Processing and Communication Systems, 2005. ISPACS 2005. Proceedings of 2005 International Symposium on*, 2005, pp. 297–300.
- [13] S. R. A. Dods, "Fiber vector modesolver - improvements to the efficient 4x4 matrix method," in *Proceedings of the OSA*, Uncasville, Connecticut, USA, Abr. 2006.
- [14] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*. Wiley, Mai 1989.
- [15] D. Davidson, "Single-Mode wave propagation in cylindrical optical fibers," in *Optical-fiber transmission*, 1a. ed., E. E. B. Basch, Ed. H.W. Sams, Jun. 1987, pp. 27–64.
- [16] H. Sunak e S. Bastien, "Refractive index and material dispersion interpolation of doped silica in the 0.6-1.8 μm wavelength region," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 1, no. 6, pp. 142–145, 1989.
- [17] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, 1a. ed. Addison-Wesley Professional, 1989.
- [18] M. Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*. The MIT Press, Fev. 1996.
- [19] L. M. Schmitt, "Theory of genetic algorithms," *Theoretical Computer Science*, vol. 259, no. 1-2, pp. 1–61, Mai 2001. [Online]. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V1G-430WWX9-1/2/192197d180d4a3f2f8187e67eccfb46f>
- [20] W. Zhang, C. Wang, J. Shu, C. Jiang, e W. Hu, "Design of fiber-optical parametric amplifiers by genetic algorithm," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 16, no. 7, pp. 1652–1654, 2004.
- [21] S. Manos e L. Poladian, "Optical fibre design using evolutionary strategies," *Engineering Computations*, vol. 21, no. 6, pp. 564–576, 2004.
- [22] M. Wall, "GAlib," <http://lancet.mit.edu/ga/>. [Online]. Disponível em: <http://lancet.mit.edu/ga/>
- [23] J. da Silva, V. Rodriguez-Esquerre, e H. Hernandez-Figueroa, "Coupling characteristics of step index holey fiber," in *Microwave and Optoelectronics Conference, 2007. IMOC 2007. SBMO/IEEE MTT-S International*, 2007, pp. 245–249.
- [24] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics, Second Edition*, 2a. ed. Academic Press, Fev. 1995.
- [25] A. Rieznik, T. Tolisano, F. A. Callegari, D. Grosz, e H. Fragnito, "Uncertainty relation for the optimization of optical-fiber transmission systems simulations," *Optics Express*, vol. 13, no. 10, pp. 3822–3834, Mai 2005.
- [26] M. Marhic, *Fiber Optical Parametric Amplifiers, Oscillators and Related Devices*, 1a. ed. Cambridge: Cambridge University Press, Dez. 2007.

Apêndice A

Fibra com Uma Camada

A fibra \mathcal{F}_1 foi projetada para ser uma fibra de uma camada (*single-layer*) altamente não-linear com zero de dispersão λ_0 em 1500 nm. Como objetivo secundário gostaríamos também de que ela tivesse dispersão de quarta ordem positiva na região do zero de dispersão, isto é, $\beta_4(\omega_0) > 0$, pelos motivos descritos na seção 3.2.2. Mantivemos a casca da fibra composta por sílica não dopada e seu núcleo com dopagem máxima de 2% em relação à casca, requisitos iguais aos impostos para as fibras desenvolvidas.

Geramos então famílias de curvas dos parâmetros que nos interessam em função do raio e da dopagem do núcleo da fibra para escolhermos tais valores. Os gráficos obtidos para λ_0 e $\beta_4(\omega_0)$ encontram-se nas figuras A.1 e A.2 respectivamente.

Observando esses resultados vemos claramente que não é possível projetar a fibra para ter a dispersão de quarta ordem positiva dentro das restrições impostas. Escolhemos então o perfil de \mathcal{F}_1 de modo a minimizar o módulo desse parâmetro posicionando λ_0 em 1500 nm, utilizando Δn máximo e raio do núcleo de 1,95 μm . Quanto ao valor do coeficiente de não-linearidade γ da fibra, vemos na figura A.3 que seu valor é suficiente para corretamente considerarmos a fibra como altamente não-linear.

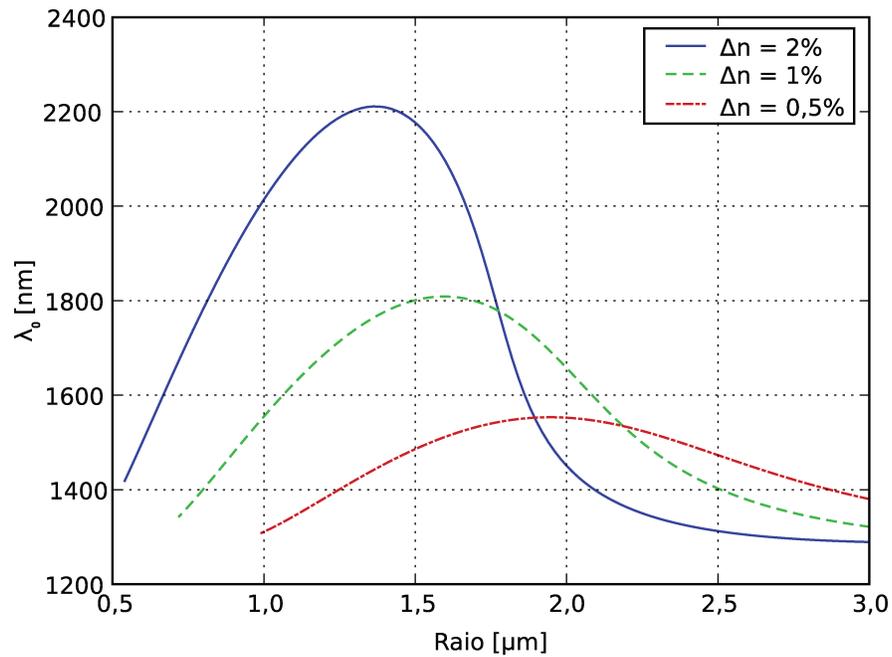


Figura A.1: Curvas do zero de dispersão da fibra de uma camada em função da dopagem e do raio de seu núcleo.

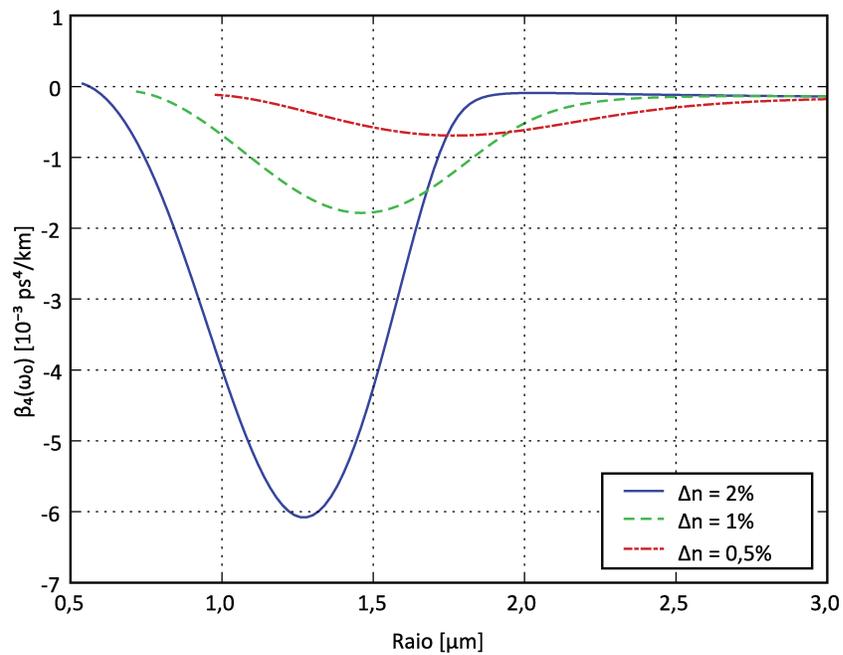


Figura A.2: Curvas da dispersão de quarta ordem no zero de dispersão da fibra de uma camada em função da dopagem e do raio de seu núcleo.

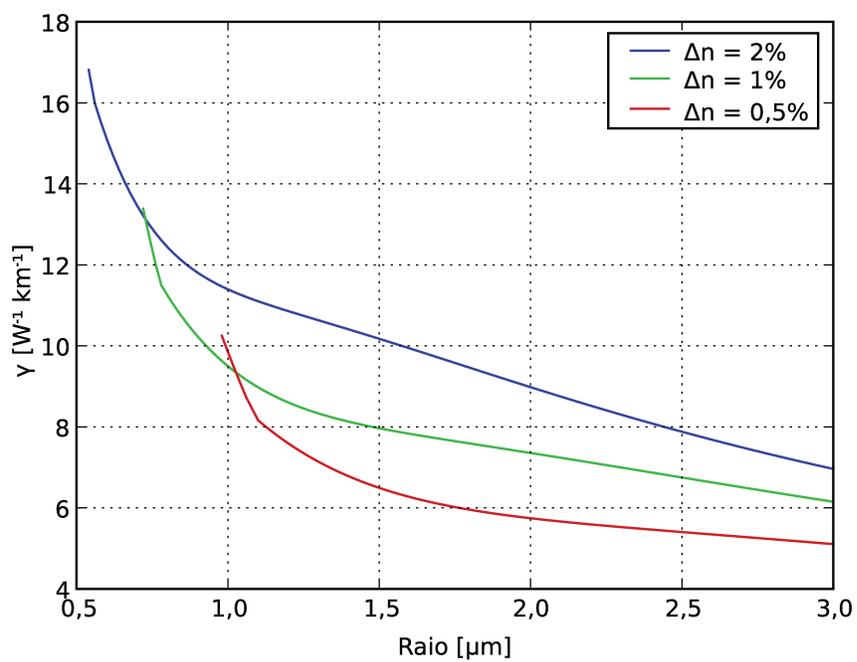


Figura A.3: Curvas do coeficiente de não-linearidade da fibra de uma camada em função da dopagem e do raio de seu núcleo.

Apêndice B

Relação entre Potência, Comprimento, Banda e Ganho no FOPA

Durante os trabalhos de otimização de sintonização de bombeios dos amplificadores paramétricos notamos nitidamente que, dada uma fibra qualquer, há uma relação de compromisso entre a potência inserida na fibra e seu comprimento com a largura de banda e o ganho desejados (para um valor fixo de *ripple*).

A matriz de transferência (4.28) mostra que é possível manter-se o ganho aproximadamente constante mantendo o produto entre potência total de bombeios P_0 e comprimento da fibra constante L . A largura de banda por outro lado, depende mais exclusivamente do fator κ , estando ligada diretamente à potência, mas não ao comprimento da fibra. Logicamente o valor máximo aceitável de *ripple* também influencia diretamente a largura de banda do FOPA.

Essas relações estão exemplificadas na tabela B.1, onde também apresentamos os comprimentos de onda centrais dos amplificadores, para mostrar que mesmo esse parâmetro varia dependendo da relação entre a potência dos bombeios e o comprimento da fibra.

Tabela B.1: Relação entre parâmetros e características de amplificação dos FOPAs (exemplos realizados para a fibra \mathcal{F}_4).

P_0 (W)	L (m)	<i>Ripple</i> (dB)	G (dB)	B (nm)	λ_c (nm)
7,00	221,00	0,4	35,4	191,0	1452,93
7,00	221,00	0,7	35,3	198,8	1452,93
1,75	884,00	1,4	34,9	154,2	1452,92
3,50	442,00	1,3	35,0	182,2	1452,93
7,00	221,00	1,3	34,9	214,2	1452,94
14,00	110,50	1,3	34,9	255,2	1452,94
28,00	55,25	1,5	34,8	284,8	1452,94