



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE  
COMUNICAÇÃO E AUTOMAÇÃO**

**JOÃO MARIA CÂMARA**

**ANÁLISE DE FIBRAS ÓPTICAS BASEADAS EM QUASE  
CRISTAIS FOTÔNICOS**

**MOSSORÓ – RN, NOVEMBRO DE 2014**

**JOÃO MARIA CÂMARA**

**ANÁLISE DE FIBRAS ÓPTICAS BASEADAS EM QUASE  
CRISTAIS FOTÔNICOS**

Dissertação de mestrado acadêmico submetida ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação (PPGSCA), como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Orientador: Prof. Dr. José Patrocínio da Silva –  
UFRN

Co-orientador: Prof. Dr. Humberto Dionísio de  
Andrade – UFERSA

**MOSSORÓ – RN, NOVEMBRO DE 2014**

**O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade de seus  
autores**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

**Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)**

**Setor de Informação e Referência**

C172a Câmara, João Maria

Análise de fibras ópticas baseadas em quase cristais  
fotônicos. / João Maria Câmara. -- Mossoró, 2014.  
67f.: il.

Orientador: Prof. Dr. José Patrocínio da Silva

Co- Orientador: Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade

Dissertação (Mestrado em Sistemas de Comunicação e  
Automação) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Pró-  
Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação.

1. Acoplador óptico. 2. Fibras ópticas. 3. Quase cristais  
fotônicos. 4. Dispersão Cromática. I. Título.

RN/UFERSA/BCOT /879-14

CDD: 004

Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa

CRB-15/120


**JOÃO MARIA CÂMARA**

**ANÁLISE DE FIBRAS ÓPTICAS BASEADAS EM QUASE  
CRISTAIS FOTÔNICOS**

Dissertação de mestrado acadêmico submetida ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação (PPGSCA), como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

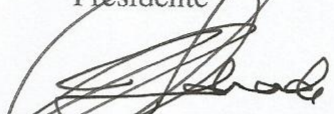
APROVADA EM: 07 / 11 / 2014.

**BANCA EXAMINADORA**




---

Prof. Dr. José Patrocínio da Silva – UFRN  
Presidente



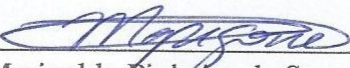
---

Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade – UFERSA  
Co-orientador



---

Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior – UFERSA  
Membro Interno



---

Prof. Dr. Marinaldo Pinheiro de Sousa Neto – IFRN  
Membro Externo

Mossoró, 07 de novembro de 2014.

**Dedicatória:**

*Dedico esta dissertação aos meus pais **Luiz** e **Sílvia** (in memoriam) pelo exemplo de vida, e dedicação que tiveram aos filhos. Mesmo diante das dificuldades e dos obstáculos que a vida lhes apresentou, nunca esqueceram a ternuram e o bom humoe.*

*Dedico este trabalho a minha esposa e aos meus filhos pela compreensão e força que me deram para encarar mais este desafio.*

## **Agradecimentos**

A Deus por sempre meu alicerce, minha base maior, que me ajuda ser firme e forte na fé, a manter-me fiel, a ter discernimento no dia-a-dia e a nunca fazer desesperar diante das dificuldades.

A Ceíça, minha esposa e eterna companheira de todas as horas, pelo incentivo e apoio nesta tarefa, mesmo que tardia, mas nunca é tarde para ser feliz.

Aos meus filhos que nunca deixaram de acreditar em mim e sempre me encorajaram para realizar meus sonhos.

Aos Professores Patrocínio e Humberto Dionísio pela ajuda e compreensão no desenvolver deste trabalho.

## RESUMO

Neste trabalho, serão analisadas duas aplicações envolvendo fibra óptica. Na primeira aplicação um novo projeto de um acoplador de fibra óptica constituída por dois e três núcleos a partir de uma fibra com índice degrau é proposta e analisada através de uma formulação vetorial baseada em elementos finitos aplicada em conjunto com o Algoritmo Genético (GA). A fibra é feita de sílica pura e sílica dopada com germânio e contém dois e três núcleos idênticos separados por uma distância  $d$ . A estrutura proposta apresenta uma geometria bastante simples, e cada fibra que compõe o acoplador é obtida através da inclusão de um buraco de ar muito pequeno no núcleo de cada uma das fibras de índice degrau convencional. Na segunda aplicação, fibras ópticas constituídas por quase cristais fotônicos, através de uma matriz quase periódica e simétrica é analisada através do método dos elementos finitos, aplicado em conjunto com camadas perfeitamente casadas do tipo cilíndricas. A estrutura é composta por sílica dopada com germânio e é originada a partir de doze distribuições de buracos de ar organizados simetricamente com um defeito provocado pela ausência do buraco de ar central.

*Palavras-Chave:* Fibras ópticas, Acoplador Óptico, Quase Cristais Fotônicos e Dispersão Cromática.

## ABSTRACT

In this work, it is analyzed two applications involving optical fiber. In the first application, a new design of an optical fiber coupler composed by two and three cores from a fiber with step index is proposed and analyzed using a vector formulation based on finite element applied in conjunction with genetic algorithm (GA). The fiber is made with pure silica and silica doped with germanium and it is composed by two and three identical cores separated by distance  $d$ . The proposed structure has a very simple geometry, and each fiber that composed the coupler is obtained by inclusion of a very small air hole at the core of each conventional step index fibers. Next, optical fiber composed by photonic quasi-crystals, through a quasi-periodic and symmetric matrix, is analyzed using the finite element method, applied in conjunction with perfectly matched layers of type cylindrical. The structure is composed of germanium-doped silica and it is originates from twelve distributions of air holes arranged symmetrically with a defect caused by the absence of central air hole.

*Keywords:* Optical Fibers, Optical Couplers, Photonics Quasi-Crystals and Chromatic Dispersion.



## SUMÁRIO

Capítulo 1. Introdução	11
Capítulo 1. Revisão Bibliográfica	15
2.1. Estruturas de Fibras Ópticas	15
2.2. Principais Vantagens de Uma Fibra Óptica	16
2.3. Principais desvantagens de uma fibra óptica	17
2.4. Classificação das fibras ópticas	18
2.5. dispersão em fibras ópticas	22
2.6. Fibras de cristais fotônicos	23
2.7. Classificação das fibras de cristais fotônicos	27
2.8. Tecnologias em fibras de cristais fotônicos	29
2.9. Fibras de cristais fotônicos com núcleo sólido	33
2.10. Processos de Fabricação de fibras de cristal fotônico	35
2.11. Conclusão	37
Capítulo 3. Proposta do trabalho	38
3.1. Caracterização do Problema – Projeto do Acoplador	39
3.2. Algoritmo genético	41
3.3. Introdução a formulação por elementos finitos	43
3.4. Projeto da PQCF	45
3.5. Conclusão	47
Capítulo 4. Resultados e discussões	48
4.1. Análise de acopladores baseados em SIHF	48
4.2. Dispersão cromática em uma fibra óptica baseada em quase cristal fotônico	54
4.3. Conclusão	60
Capítulo 5. Conclusões	61
Capítulo 6. Trabalhos futuros	62
Referências bibliográficas	62

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Componentes de uma Fibra óptica.	15
Figura 2.2 Fibra óptica multimodo.	19
Figura 2.3 Fibra óptica monomodo.	19
Figura 2.4 Fibra óptica com índice de refração degrau.	20
Figura 2.5 Fibra óptica com índice de refração na forma gradual.	21
Figura 2.6 Exemplos de cristais fotônicos (a) unidimensional, (b) bidimensional e (c) tridimensional.	22
Figura 2.7 Cristal fotônico unidimensional.	25
Figura 2.8 Exemplo de cristal fotônico bidimensional: arranjo em rede quadrada de colunas dielétricas de raio $r$ e constante dielétrica $\epsilon$ .	26
Figura 2.9 Esquema de luz confinada ao núcleo de uma estrutura de cristal fotônico.	29
Figura 2.10 Seção transversal de uma PCF bidimensional que utiliza o princípio PBG para o guiamento de luz.	30
Figura 2.11 Exemplo de uma estrutura envolvida por PML na modelagem por elementos finitos.	32
Figura 2.12 Diferentes estruturas de PCF de Núcleo sólido (SANTOS, 2007).	33
Figura 2.13 Diferentes estruturas de Fibras de Cristal Fotônico com Núcleo Oco.	34
Figura 2.14 Processo de fabricação de pré-formas por furação e algumas pré-formas prontas para serem levadas à torre de puxamento.	35
Figura 2.15 Esquema da fabricação de pré-formas por extrusão e tamanho típico da pré-forma fabricada.	36
Figura 2.16 (a) Esquema do empilhamento da pré-forma (b) pré-forma empilhada.	37
Figura 3.1 (a) Perfil de índice de refração da SIHF e (b) constantes de propagação normalizada para os dois primeiros modos da SIHF considerando $\eta_1 = 1.05214$ , $\eta_2 = 1.0$ , $r_1 = 0.2 \mu\text{m}$ e $r_2 = 1.8 \mu\text{m}$ .	40
Figura 3.2 Acoplador constituído por: (a) SIHF com dois núcleos e (b) SIHF com três núcleos.	41
Figura 3.3 Estágios da evolução da população de cromossomos.	42
Figura 3.4 Estrutura de quase cristal fotônico e (b) Seção transversal da fibra de quase cristal fotônico com simetria 12 vezes.	46

Figura 4.1 Dispersão Cromática em função do índice do comprimento de onda.	49
Figura 4.2 Potência normalizada ao longo da direção de propagação, $z$ , para o acoplador com dois núcleos com $\ell = 0,5 \mu\text{m}$ .	50
Figura 4.3 Potência normalizada ao longo da direção de propagação, $z$ , para o acoplador com dois núcleos com $\ell = 1,0 \mu\text{m}$ .	51
Figura 4.4 Transferência de energia entre os núcleos da SIHF para o acoplador com dois núcleos considerando $\ell = 1.0 \mu\text{m}$ e $\lambda = 2.2 \mu\text{m}$ .	51
Figura 4.5 Potência normalizada ao longo da direção de propagação para o acoplador constituído a partir de uma SIHF com três núcleos considerando $\ell = 0,5 \mu\text{m}$ .	53
Figura 4.6 Potência normalizada ao longo da direção de propagação para o acoplador constituído a partir de uma SIHF com três núcleos considerando $\ell = 1,0 \mu\text{m}$ .	54
Figura 4.7 Dispersão cromática para o modo fundamental da estrutura com simetria 12 vezes considerando $d/\Lambda = 0,31$ para um faixa de comprimentos de onda de 1,25 a 2,0 $\mu\text{m}$ .	55
Figura 4.8 Dispersão cromática para o modo fundamental da estrutura com simetria 12 vezes considerando $d/\Lambda = 0,31$ para uma faixa de comprimentos de onda de 1.4 a 1,6 $\mu\text{m}$ .	56
Figura 4.9 Comparação entre as dispersões cromáticas para o modo fundamental da PQCF com simetrias 12 e 6 vezes, considerando $d/\Lambda = 0,31$ e $d = 0,75 \mu\text{m}$ .	57
4.10 Dispersão cromática para os dois primeiros modos da PQCF com simetria 12 vezes considerando $d/\Lambda = 0,31$ e $d = 0,75 \mu\text{m}$ .	58
Figura 4.11 Área efetiva do modo fundamental da PQCF com simetria 12 vezes e simetria 6 vezes considerando $d = 0,75$ e $d/\Lambda = 0,31$ .	58
Figura 4.12 Dispersão cromática para o modo fundamental da estrutura com simetria 12X considerando variações de $d/\Lambda$ para uma faixa de comprimentos de onda variando de 1,25 $\mu\text{m}$ a 1,8 $\mu\text{m}$ .	59
Figura 4.13 Distribuição de campo para o modo fundamental com $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ (a) Curva de níveis e (b) Superfície.	60

## LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

WDM	Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda do inglês <i>Wavelength Division Multiplexing</i> .
PCF	Fibra de Cristal Fotônico do inglês <i>Photonic Crystal Fiber</i>
PQC	Quase Cristais Fotônicos do inglês <i>Photonics Quasi-Crystal</i>
SIHF	Fibras com Índice Degrau de Núcleo Perfurado do inglês <i>Step Index Hollow Fiber</i>
PMLs	Camada Perfeitamente Casadas do inglês <i>Perfectly Matched Layer</i>
PBG	Do inglês <i>Photonic Band Gap</i>
PQCF	Fibras de Cristal Quase Fotônico do inglês ( <i>Photonic Quasi-Crystal Fiber</i> )
CPML	Camada Perfeitamente Casada Do inglês ( <i>Cylindrical Perfectly Matched Layer</i> )
FEM	Método dos Elementos Finitos do inglês <i>Finite Element Method</i>
AGs	Algoritmos Genéticos

## Capítulo 1 - Introdução

A intensa e crescente utilização do espectro eletromagnético em sistemas de comunicações levou a busca de condições e meios que permitissem ampliar e otimizar seu emprego. Deste esforço, surgiram as fibras ópticas como meio viável de transporte de informação, que inicialmente apresentava perdas consideráveis (AGRAWAL, 2002). Apesar disso, as fibras continuaram a ser pesquisadas e com o decurso do tempo, surgiram às fibras de baixas perdas, com características importantes que as transformaram em um meio de transmissão sem precedentes, para a comunicação de longa distância. Para se ter uma idéia, do sucesso das fibras ópticas como meio de transmissão, em 1992 a maior capacidade de um link comercial constituído por estas fibras era de 2.5Gb/s, quatro anos mais tarde o Sistema da Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda do inglês *Wavelength-Division-Multiplexed* (WDM), já trabalhava com uma capacidade total de 40Gb/s (AGRAWAL, 2002). Por volta do ano de 2001, a capacidade comercial do sistema WDM já excedia 1.6Tb/s.

O fenômeno da reflexão interna total, responsável pelo o guiamento da luz em fibras ópticas, é conhecido desde 1954 (AGRAWAL, 2002). A transmissão da luz pela fibra segue um princípio único, independentemente do material usado ou da aplicação: é lançado um feixe de luz numa extremidade da fibra e, pelas características ópticas do meio (fibra), esse feixe é propagado por meio de reflexões internas sucessivas. A fibra possui no mínimo duas camadas: o núcleo e o revestimento (casca). No núcleo, ocorre a transmissão da luz propriamente dita. A transmissão da luz dentro da fibra é possível devido a uma diferença de índice de refração entre o revestimento e o núcleo, sendo que o núcleo possui sempre um índice de refração mais elevado, característica que aliada ao ângulo de incidência do feixe de luz, possibilita o fenômeno da reflexão total (DA SILVA, J. P, 2003).

Dois parâmetros fundamentais marcam a evolução tecnológica das fibras ópticas: a atenuação óptica de transmissão e a dispersão cromática. Estes parâmetros determinam as características do enlace, isto é, as distâncias de propagação e a capacidade de transmissão do sistema. Com o intuito de reduzir os efeitos da atenuação da dispersão, surgiram as fibras de modo único, popularmente conhecidas como fibras

monomodo. Esse modelo de fibra óptica caracteriza-se por suportar um único modo, conhecido por modo fundamental, que está presente em qualquer modelo de fibra óptica.

No início da década de 90, surgiram comercialmente às fibras monomodo com dispersão deslocada para operação na terceira janela de transmissão (1.530-1.565 nm), como uma evolução das fibras monomodo convencionais (AGRAWAL, 2002). Devido a sua baixa atenuação e dispersão na janela de 1.550 nm, estas fibras começaram a ganhar mercado, principalmente para as aplicações de longa distância, em que a dispersão cromática era fator limitante para o enlace óptico.

O Brasil, só há cerca de 30 anos é que ingressava no então seleto grupo de países que pesquisavam e usava fibras ópticas, e uma das primeiras redes construídas por fibras ópticas, foi instalada na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), em maio de 1977, para testes de telecomunicações, (VASCONCELOS, 2001). As telecomunicações passaram então, por uma verdadeira revolução com massificação do uso das fibras ópticas no lugar dos fios de cobre. Hoje, três décadas depois, a UNICAMP continua na vanguarda das pesquisas sobre essa tecnologia e sedia um laboratório focado no estudo e desenvolvimento de fibras de cristal fotônico, também conhecidas como PCF do inglês (*Photonic Crystal Fiber*), consideradas uma nova geração de fibras ópticas que ampliam o uso desses materiais, por exemplo: para a biologia, para a química e na construção de dispositivos de alto desempenho, tais como os acopladores de fibra de cristal fotônico.

As fibras de cristal fotônico fazem parte de um grupo maior conhecido como fibras ópticas especiais, porque possuem inovações estruturais que as diferenciam das demais. A principal diferença entre as fibras de cristal fotônico e as tradicionais é que as primeiras possuem um arranjo regular de buracos, de ordem micrométrica, equivalente a um milionésimo do metro, e que são inseridos paralelos ao eixo da fibra ao longo de seu comprimento (VASCONCELOS, 2008). A vantagem desses micro furos é permitir um rígido e extenso controle do guiamento da luz, o que torna a fibra mais versátil. Isso ocorre porque a microestrutura pode ser projetada de diferentes formas, de maneira a lhe conferir as propriedades que se desejar. Assim é possível elaborar fibras para um amplo conjunto de aplicações. Além de redes e equipamentos do setor de telecomunicações, as PCFs, podem ser usadas na fabricação de dispositivos a laser, fontes de luz ou sensores ópticos ultra-sensíveis e acopladores a base de fibras de cristal fotônico. Os acopladores constituídos a partir das esses modelos de fibras, representam uma classe de

acopladores, que pode variar de dois a vários núcleos em uma mesma fibra, ou obtidos a parti do processo de fundição de várias fibras monomodo (JESUS, 1985).

A saber, para viabilizar a implantação dos sistemas de comunicações com base em fibras ópticas, vários dispositivos ativos e passivos foram e continuam sendo desenvolvidos para este propósito. Entre estes podemos citar os lasers, detectores, conectores, chaves ópticas, polarizadores e acopladores (JESUS, 1985). Dentre estes, destaca-se os acopladores direcionais que desde seu desenvolvimento, sua utilização tem sido indicada para sistemas ópticos, entretanto, o alto custo destes dispositivos impossibilita sua aplicação para uma gama maior de sistemas ópticos. Entretanto, com o desenvolvimento dos acopladores à base de fibras de cristais fotônicos com múltiplos núcleos, o custo destes tipos de dispositivos vem caindo ao longo dos anos poderá, visto que vários núcleos poderão ser inseridos em uma única fibra de cristal fotônico, evitando assim o processo de fundição entre varias fibras, reduzindo os custos de fabricação (SHAIENDRA,2009).

Mais recentemente, um novo modelo de fibra óptica, também tem atraído à atenção de pesquisadores, são as fibras constituídas a partir de quase cristais fotônicos. Estruturas compostas por quase cristais fotônicos, do inglês *Photonics Quasi-Crystal* (PQC), representam uma classe de estruturas que vem sendo bastante estudada nos últimos anos, sobretudo devido sua aplicação no desenvolvimento de fibras ópticas. Esses tipos de estruturas caracterizam-se por não conterem simetria de translação, normalmente presente nos cristais fotônicos tradicionais.

A saber, um cristal fotônico é um material estruturado de tal forma, que sua função dielétrica varia periodicamente no espaço e pode ser considerado, dependendo da aplicação, como nanoestruturas ópticas, periódicas e que estão desenhadas para afetar o movimento dos fótons, de um modo similar ao que a periodicidade de um cristal semiconductor afetaria o movimento dos elétrons (AGRAWAL, 2002). Por outro lado, os quase cristais são caracterizados por um alinhamento muito incomum dos átomos e contêm estruturas aperiódicas, ou seja, possuem pelo menos dois padrões simétricos diferentes, que formam uma estrutura também sem lacunas, mas que não se repetem regularmente (SOAN, 2009). Desta forma, sob essas circunstâncias, podem originar simetrias de 6, 8, 10 e até 12 vezes. A maior dificuldade para aplicação destes tipos de estruturas, no desenvolvimento de novos modelos de fibras ópticas, se deve ao fato de que os quase cristais fotônicos exigem condições muito especiais de laboratório para serem produzidos. Entretanto, as fibras de quase cristais fotônicos, do inglês,

*Photonics Quase-Crystal Fibers* (PQCF), têm atraído à atenção da comunidade científica, devido a sua capacidade de apresentar simetria em altas ordens, como por exemplo, simetria com doze repetições, também conhecida como simetria doze vezes. Essa importante característica, permite o desenvolvimento de fibras ópticas com dispersão cromática plana para diversos comprimentos de onda.

Em adição, com o advento das fibras de quase cristais fotônicos, onde buracos de ar são distribuídos em uma matriz de sílica, ou de sílica dopada, ao longo de todo o comprimento da fibra, tornou-se possível a obtenção de múltiplos arranjos de buracos de ar organizados simetricamente em uma única fibra (DA SILVA, 2013). Essa característica coloca as PQCFs como estruturas versáteis para obtenção de dispersão cromática ultra plana.

Neste trabalho, o método dos elementos finitos em conjunto com camadas perfeitamente casadas (PML – do inglês *Perfectly Matched Layer*) (BERENGER, 1994), é aplicado na análise de alguns modelos de fibra ópticas baseadas em quase cristais fotônicos com simetria seis e doze vezes. Além dessa aplicação, características de acoplamento entre os núcleos de uma fibra com furo de ar no núcleo que tem índice degrau, são analisadas. Esse modelo fibra é conhecido pela designação em inglês *Step Index Holley Fiber*(SIHF). Nessa aplicação, as SIHF apresentam dispersão cromática ultra plana para uma grande largura de banda e foram otimizadas através de Algoritmo Genético (GA).

A estrutura do trabalho é apresentada conforme descrito a seguir.

- No **Capítulo 1** é introduzida a caracterização do problema a ser explorado pelo trabalho.
- No **Capítulo 2** são apresentados os fundamentos teóricos e definições da aplicação de elementos finitos para análise de fibras ópticas.
- No **Capítulo 3** é descrito a proposta do trabalho, detalhando a aplicação utilizando Algoritmo Genético.
- No **Capítulo 4** são apresentados e discutidos os resultados preliminares das simulações.
- No **Capítulo 5** é proposto o cronograma com a descrição das atividades a serem desenvolvidas para a conclusão do presente trabalho.



## Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

Este capítulo abordará conceitos fundamentais ao desenvolvimento do trabalho. Será apresentada uma visão geral sobre fibras ópticas, enfatizando os tipos fibras, vantagens, desvantagens e modelos. Serão apresentados alguns tipos de fibras bem como modelos que serão usados em acopladores à base de fibra de cristais fotônicos. Neste capítulo será feita também uma importante introdução as fibras de cristais fotônicos, incluindo alguns métodos de confecção deste novo modelo de fibra óptica.

### 2.1 ESTRUTURAS DAS FIBRAS ÓPTICAS

Uma fibra óptica pode ser vista como guia de onda, onde a portadora é um feixe de luz, sendo que as fibras para comunicação óptica são fios de dimensões capilares, flexíveis e fabricados de material dielétrico e transparente, o bastante, para guiar um feixe de luz visível ou infravermelho por quilômetros de distância. Normalmente, as fibras são construídas de sílica pura ou sílica dopada. Dentre os principais dopantes para as fibras de sílica, podem-se citar o érbio, o germânio e o flúor (OLIVEIRA, 2002).

As fibras ópticas são formadas por dois materiais cristalinos e homogêneos. O material que ocupa o centro da fibra é denominado de núcleo, e o externo, que o envolve, é denominado de capa ou casca, que possui um índice de refração menor que o núcleo para possibilitar a propagação da luz, como mostrado na Figura 2.1 (OLIVEIRA, 2002). Essa diferença de índice de refração é obtida usando-se materiais diferentes na composição do núcleo e da casca, tais como plástico e materiais semicondutores (Germânio, Flúor, Fósforo etc.).

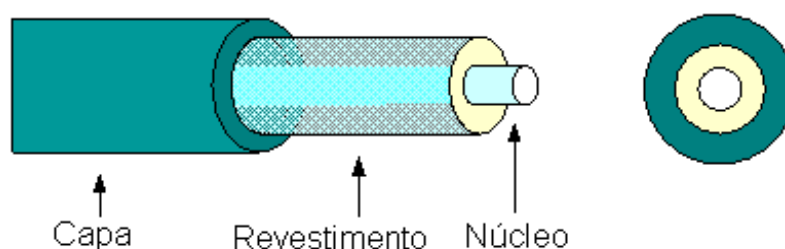


Figura 2.1: Componentes de uma Fibra óptica

## 2.2 PRINCIPAIS VANTAGENS DE UMA FIBRA ÓPTICA

As fibras ópticas apresentam várias vantagens em relação aos meios de comunicação mais conhecidos e usados nas empresas (Maldonado, 2003), a seguir serão definidas algumas dessas vantagens:

- Imunidade a Interferências Externas – As fibras são constituídas de materiais com características dielétricas, isto faz com que ela tenha total imunidade a qualquer interferência de qualquer intensidade que venha do meio externo, com isso independente do nível de ruído existente no local em que a fibra óptica esteja instalada o tráfego de informações esta garantido com total fidelidade. A utilização de cabos ópticos totalmente imunes a interferências evita problemas com aterramento de cabos e equipamentos devido ao isolamento elétrico que os materiais que constituem os cabos proporcionam. No aspecto de segurança os cabos ópticos são indicados para locais com riscos de explosão, por exemplo, ambiente com presença de gases inflamáveis, já que não existe risco de curto-circuito, faíscas e choques elétricos.

- Dimensões Reduzidas – Uma das maiores vantagens dos cabos ópticos é a sua espessura, não levando em conta os revestimentos necessários para sua proteção, um cabo óptico chega a ser 20 vezes mais fino do que os cabos convencionais e com a mesma capacidade de transmissão. Para termos uma idéia a espessura de uma fibra óptica típica, podemos compará-la a um fio de cabelo (a fibra é um pouco mais espessa que o fio de cabelo).

- Segurança no Tráfego de Informações – A transmissão dos dados em um cabo óptico é feita através de sinais luminosos o que dificulta e muito os “grampos” utilizados para obter informações sigilosas. Para decifrar estes sinais e conseguir absorver alguma informação seria necessário equipamento sofisticado e muito conhecimento por parte do operador. Por isso as fibras são utilizadas em aplicações que necessitam de maior segurança, como aplicações bancárias, militares e de pesquisa.

- Maior Alcance de Transmissão – Devido ao baixíssimo índice de perda na comunicação através das fibras ópticas as distâncias percorridas pelos cabos ópticos sem necessidade de repetidores chegam a até 250 km. Essa distância é 5 vezes maior que a alcançada em uma comunicação feita através de micro-ondas (50Km). Mas a distância alcançada pelo cabo óptico aumentará em breve, já que o desenvolvimento dos

equipamentos envolvidos na transmissão e recepção de dados visa aumentar a potência na transmissão.

- **Maior Capacidade de Transmissão** – A capacidade de transmissão está relacionada com a frequência das portadoras ou do comprimento da onda de luz. No caso das fibras ópticas, dependendo do tipo (monomodo ou multimodo), pode-se encontrar valores de 160 MHz/Km, 500 MHz/Km ou centenas de THz/Km. Por sua vez, os sistemas convencionais de micro-ondas estão limitados a 700 MHz/Km. Isto demonstra a possibilidade de expansão do número de canais de voz, vídeo e dados no mesmo meio de transmissão. A fibra não é mais rápida que os meios de comunicação mais comuns. Para melhor entendermos a capacidade de transmissão das fibras vamos imaginar duas situações, na primeira um automóvel com 5 passageiros a 60Km/h e na segunda um trem com 800 passageiros andando nos mesmos 60Km/h. A velocidade é a mesma, mas a quantidade de passageiros é muito maior. Analogamente, a transmissão de dados por fibra óptica não é necessariamente mais veloz que os meios de comunicações mais utilizados, mas sim transmite mais informações por vez.

- **Relação Custo / Benefício** – Dependendo da aplicação, os cabos ópticos têm maior relação custo/benefício do que os outros meios de comunicação utilizados. Um exemplo disto são os sistemas de comunicação a longas distâncias, pois os cabos ópticos têm maior capacidade de transmissão e maior alcance entre os repetidores, enquanto os meios convencionais de transmissão por micro ondas têm sua capacidade de transmissão limitada a 50 km entre os repetidores. Para pequenas distancias os cabos ópticos são relativamente caros, mas se levarmos em consideração as futuras expansões que deverão sofrer as instalações, o custo do cabo óptico passa a ser competitivo devido à grande facilidade de expansão das fibras ópticas.

- **Ausência de Diafonia (Linha Cruzada – Crosstalk)** – As fibras ópticas não causam interferência entre si, eliminando assim um problema comum enfrentado nos sistemas com cabos convencionais, principalmente nas transmissões em alta frequência, eliminando necessidade de blindagens que representam parte importante do custo de cabos metálicos.

### 2.3 PRINCIPAIS DESVANTAGENS DE UMA FIBRA ÓPTICA

Como todo meio de transmissão, as fibras ópticas também têm suas desvantagens como (Maldonado, 2003):

- Fragilidade – Uma fibra óptica é infinitamente mais frágil do que os cabos convencionais, não podendo ser manuseada facilmente sem estar revestida.
- Dificuldade de conexão – Por terem dimensões reduzidas às fibras exigem alta precisão em seu manuseio e na realização de conexões e junções. As fibras são de difícil acoplamento, o que torna a fibra óptica inviável para utilização em sistemas multiponto.
- Impossibilidade de alimentação remota de repetidores – Para alimentar um repetidor no sistema de fibras ópticas é necessária uma alimentação elétrica independente para cada repetidor, impossibilitando uma realimentação através do próprio meio de transmissão.
- Falta de padrão dos componentes – O fato da tecnologia de transmissão por fibras ópticas estar em constante avanço não facilita o estabelecimento de padrões para os componentes de sistemas de transmissão por fibras.

## 2.4 CLASSIFICAÇÃO DAS FIBRAS ÓPTICAS

As fibras ópticas são classificadas de acordo com o seu tipo de fabricação e da forma de propagação dos raios de luz, além de sua capacidade de transmissão (Largura de Banda) e de sua facilidade de acoplamento aos equipamentos ativos e conexões. Dessa forma, dentre os modelos de fibras ópticas existentes e que serão analisados neste trabalho, podem-se classificá-las quanto ao número de modos propagados, quanto à variação do índice de refração e quanto à sua organização estrutural (BEZERRA, 2009).

### ✓ Quanto aos Modos Propagados

Quando um transmissor envia um sinal através de uma fibra óptica, os feixes de luz são geralmente propagados por caminhos distintos, chamados modos. Neste aspecto, as fibras ópticas podem, então, ser classificadas como:

Multímmodo: quando existe mais de um caminho de propagação da luz na fibra óptica, Figura 2.2 Este tipo de fibra foi o primeiro a ser desenvolvido e utilizado em sistemas de telecomunicação no fim da década de 1970 e no início da década de 1980. Um grande problema das fibras multimodo é decorrente da dispersão intermodal, discutida mais à frente, que limita a distância máxima de propagação sem o uso de regeneradores de sinal.

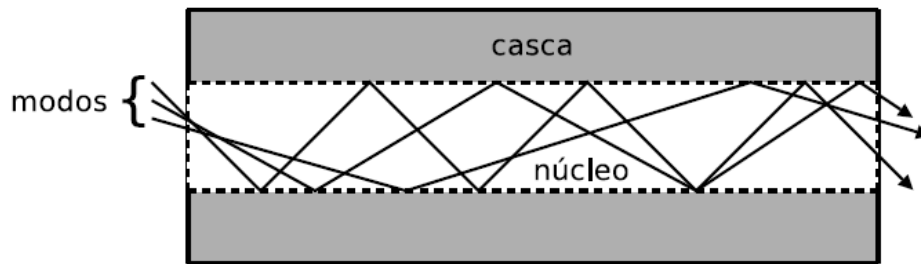


Figura 2.2: Fibra óptica multimodo.

Monomodo: quando apenas um modo é propagado através da fibra, Figura 2.3, o que, conseqüentemente, elimina a ocorrência da dispersão intermodal, permitindo transmissões mais longas, reduzindo o uso de regeneradores e diminuindo o custo de instalação das redes ópticas. Para se obter uma fibra monomodo existem 3 maneiras: reduzir a diferença de índice de refração, reduzir o diâmetro do núcleo ou aumentar o comprimento de onda da luz incidente .

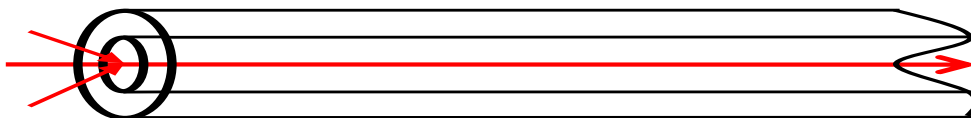


Figura 2.3: Fibra óptica monomodo.

#### ✓ Quanto à Variação do Índice de Refração

Uma das maneiras de classificar as fibras ópticas dá-se pela variação do índice de refração do material que compõe o núcleo em relação ao índice do material da casca. Com base nesta característica, existem dois tipos de fibras:

Multimodo de Índice-degrau (STEP INDEX): As fibras ópticas do tipo multimodo índice degrau (ID), foram as primeiras a surgir e são conceitualmente as mais simples, foram às pioneiras em termos de aplicações práticas. O tipo de perfil de índices e as suas dimensões relativamente grandes podem conduzir a simplicidade quanto à fabricação e facilidades operacionais. Entretanto, essa característica pode limitar a capacidade de transmissão.

As fibras multimodo com índice degrau constituem-se basicamente de materiais com índice de refração constante, ou seja, tanto a casca quanto o núcleo possuem índices constantes, porém com valores diferentes. O núcleo pode ser feito de vários materiais como plástico, vidro, etc. A casca, cuja função básica é de garantir a condição de guiamento da luz, também pode ser feita de vidro, plástico e até mesmo o próprio ar pode atuar como casca (essas fibras são chamadas de *bundle*) (SMIDERLE, 2003). Essas fibras são limitadas quanto à capacidade de transmissão, possuem atenuação elevada (maior que 5 dB/km) e pequena largura de banda (menor que 30 MHz.km) e são utilizadas em transmissão de dados para curtas distâncias e iluminação. A figura 2.4, mostra uma fibra com perfil de índice de refração em degrau.

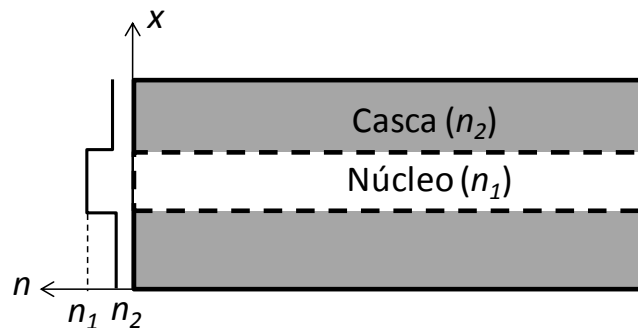


Figura 2.4: Fibra óptica com índice de refração degrau.

#### Multímodo Índice gradual (GRADED INDEX):

As fibras multimodo índice gradual (IG), de conceituação e fabricação um pouco mais complexas, caracterizam-se principalmente pela sua maior capacidade de transmissão com relação às fibras multimodo índice degrau. Desenvolvidas especialmente para as aplicações em sistemas de telecomunicações, as fibras multimodo de índice gradual apresentam dimensões menores que as de índice degrau (mas suficientemente moderadas de maneira a facilitar as conexões e acoplamentos) e aberturas numéricas não muito grandes, a fim de garantir uma banda passante adequada às aplicações.

Este tipo de fibra tem seu núcleo composto por vidros especiais com diferentes valores de índice de refração, o qual tem o objetivo de diminuir as diferenças de tempos de propagação da luz no núcleo, devido aos vários caminhos possíveis que a luz pode

tomar no interior da fibra, diminuindo a dispersão do impulso e aumentando a largura de banda passante da fibra óptica Figura 2.5

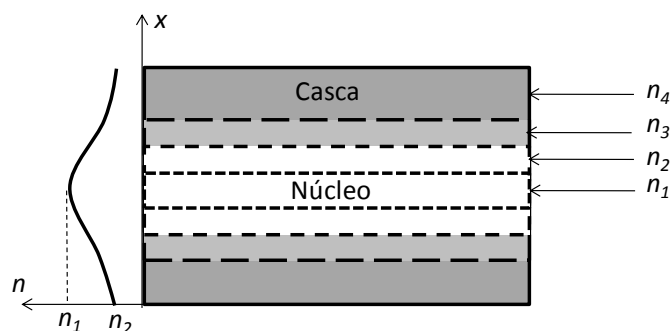


Figura 2.5: Fibra óptica com índice de refração na forma gradual.

#### ✓ Quanto à Estrutura do Guia de Onda

Apesar das fibras ópticas utilizadas em sistemas de telecomunicações atuais serem consideradas como meios de altas taxas de transmissão, os pesquisadores continuam suas buscas por melhorias na propagação do sinal óptico, dando origem a novas fibras que possuem uma estrutura interna para controle dos feixes de luz – as conhecidas fibras micro-estruturadas (BEZERRA, 2009). Dessa maneira, quanto à estrutura do guia de onda, as fibras podem ser:

Fibras Convencionais são formadas por um núcleo sólido circular composto por sílica pura. São tipos de fibra de custo de produção relativamente baixo, por possuírem uma estrutura simples e usarem uma matéria prima barata e abundante. Utilizadas em larga escala em sistemas de telecomunicações.

Fibras Micro-estruturadas: são novos modelos de fibras criadas para otimizar determinadas características de transmissão. A estrutura interna é modificada de maneira a controlar a propagação da luz, concentrando-a em determinados pontos da fibra. Furos de ar em formas geométricas regulares são comumente utilizados, como mostra a Figura 3.4.1. Este tipo de fibra impõe um desafio em sua fabricação, devido às reduzidas dimensões de sua estrutura interna (BEZERRA, 2009). Dentre as fibras micro-estruturadas pode-se incluir um novo modelo de fibra chamada de fibra de cristal fotônico, que também será estudada nesta pesquisa.

## 2.5 DISPERSÃO EM FIBRAS ÓPTICAS

A dispersão é um efeito que ocorre em diversos enlaces de comunicação e também nas redes ópticas. Em óptica, a dispersão é causada pela diferença na velocidade de propagação dos feixes de luz, também conhecido como pulso, fazendo com que determinados componentes do sinal cheguem ao destino em tempos diferentes. Isso acarreta o alargamento do pulso, causando a interferência inter-simbólica – do inglês *InterSymbolInterference* (ISI) – e provoca uma redução do espaço para representação do bit, isto é, limitando a taxa de transmissão (BEZERRA,2009). Desta forma é importante destacar os principais tipos de dispersão, que são:

### ✓ Dispersão Cromática

A dispersão cromática está presente em todos os tipos de fibras ópticas e pode ser classificadas em dois tipos:

Dispersão do material ocorre porque os comprimentos de onda do sinal transmitido são propagados em diferentes velocidades na fibra óptica. Como não há transmissores que gerem o sinal em apenas um único comprimento de onda, a dispersão do material está presente em todos os tipos de fibras, incluindo as fibras monomodo.

Dispersão do Guia de Onda é originada pela variação do índice de refração efetivo. Como o sinal se propaga pelo núcleo e também pela casca, o índice de refração efetivo é aproximado à proporção de tempo onde o sinal mais se propaga, quanto maior o tempo de propagação na casca, mais próximo do índice de refração da casca será o índice de refração efetivo (BEZERRA, 2009). A distribuição da energia do sinal entre o núcleo e a casca é função do comprimento de onda, quando maior o comprimento de onda, mais energia será propagada pela casca.

### ✓ Dispersão Intermodal

Ocorre apenas nas fibras multimodo onde os modos se propagam em velocidades distintas devido aos diferentes ângulos de incidência na região limite núcleo-casca, fazendo com que os raios de luz cheguem ao destino em tempos diferentes (BEZERRA, 2009). Uma das maneiras de se reduzir a dispersão intermodal é através do uso de fibra com índice gradual ou também reduzindo o raio do núcleo da fibra óptica e, assim propagando um número inferior de modos.



## 2.6 FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO

### ✓ Cristais Fotônicos

Ondas em meios estratificados ou com perturbações periódicas sofrem múltiplos espalhamentos quando seu comprimento de onda é comparável ao período destas perturbações. Por exemplo, elétrons – ou ondas eletrônicas – que se propagam num cristal sofrem espalhamentos múltiplos nos átomos da rede, distribuídos periodicamente no espaço. Em determinadas condições, as ondas espalhadas podem interferir construtivamente na direção oposta à direção de propagação da onda, gerando uma onda estacionária. Nesta situação, a onda não pode se propagar através do cristal, resultando em frequências (energias) com propagação proibida. As energias eletrônicas permitidas formam, então, bandas separadas por gaps de estados de energia proibidos ou *band gaps* eletrônicos. Em analogia a elétrons num cristal, fótons – ou ondas eletromagnéticas – sofrem espalhamento múltiplo em uma estrutura dielétrica cujo índice de refração (ou constante dielétrica) é espacialmente modulado com período espacial comparável ao comprimento de onda da onda eletromagnética (QUIÑÓNEZ, 2006). Em algumas estruturas dielétricas com periodicidade tridimensional não há modos de propagação em quaisquer direções para um certo intervalo de frequências, dando origem a um ‘*band gap* fotônico’ completo. Estas estruturas consistem, por exemplo, de esferas dielétricas de alto índice de refração suspensas em um de baixo índice ou furos de ar em um meio dielétrico de alto índice de refração, com constantes de rede da ordem do comprimento de onda eletromagnético.

Da mesma forma que *band gaps* eletrônicos estão relacionados a elétrons em um cristal, *band gaps* fotônicos estão relacionados a fótons em uma estrutura dielétrica periódica. Devido a essa analogia feita com elétrons em um cristal, essas estruturas dielétricas periódicas são chamadas de cristais fotônicos (QUIÑÓNEZ, 2006). A teoria desenvolvida para os cristais fotônicos se baseia em alguns conceitos utilizados no caso eletrônico, como células unitárias, rede recíproca, zonas de Brillouin, relações de dispersão, gaps de energia, etc. Algumas comparações podem ser feitas: a função de onda eletrônica deve satisfazer a equação escalar de Schrödinger enquanto que a onda eletromagnética deve satisfazer as equações vetoriais de Maxwell. Uma propriedade importante das equações de Maxwell é que elas são independentes da escala. Se todas as dimensões do sistema são multiplicadas por uma constante, as soluções são exatamente

as mesmas, com exceção das frequências, que ficam divididas por esta mesma constante. A saber, os cristais fotônicos podem ser divididos em:

- Unidimensionais
- Bidimensionais
- Tridimensionais

#### Cristais Fotônicos Unidimensionais

Um cristal fotônico unidimensional, Figura 2.6a, tem periodicidade em uma única dimensão, consiste em camadas alternadas de materiais com diferentes constantes dielétricas. No entanto, este tipo de cristal pode apresentar a propriedade de gap fotônico (*Photonic Band Gap* – PBG) apenas para luz incidente atravessando perpendicularmente as múltiplas camadas periódicas.

Um cristal fotônico bidimensional, Figura 2.6b, tem periodicidade em duas direções e é homogêneo na terceira. Apresenta PBG apenas para luz incidente no plano de periodicidade. O cristal fotônico tridimensional, Figura 2.6c, é periódico nas três dimensões, este sim é o análogo a um cristal real, pois pode apresentar PBG para quaisquer direções de incidência da luz – gerando um *band gap fotônico* completo.

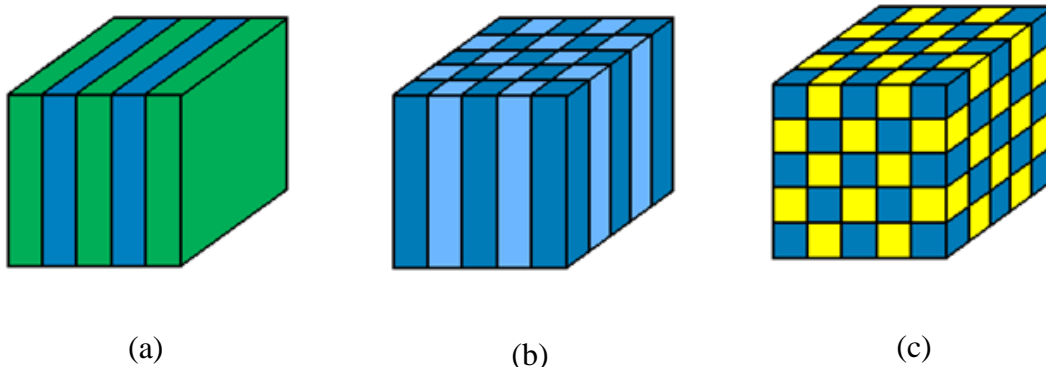


Figura 2.6 – Exemplos de cristais fotônicos (a) unidimensional, (b) bidimensional e (c) tridimensional.

Para analisar o comportamento da luz que se propaga através de um cristal fotônico vamos começar pelo caso mais simples: o cristal fotônico unidimensional que consiste em camadas alternadas de materiais com diferentes constantes dielétricas, espaçadas por uma distância  $a$ . É suposto que o cristal se estende infinitamente na direção  $z$ , Figura 2.7. Neste caso, o cristal é periódico na direção  $z$  e homogêneo no plano  $x$ - $y$ . O espaçamento entre as múltiplas camadas de materiais que compõem o cristal unidimensional é  $a$ .

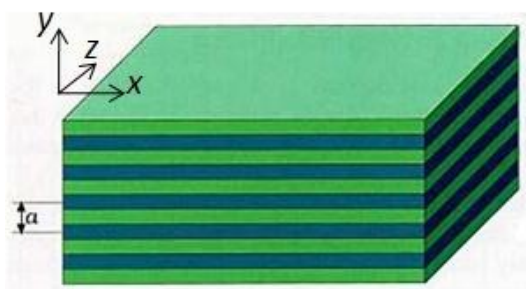


Figura 2.7 – Cristal fotônico unidimensional

#### Cristais Fotônicos bidimensionais

Cristais fotônicos bidimensionais, periódicos em duas dimensões e homogêneos na terceira, comportam-se de maneira diferente. O gap fotônico surge no plano de periodicidade. Neste caso, o PBG depende não só do contraste de constante dielétrica dos materiais e da geometria da estrutura, mais também da polarização da luz (QUIÑÓNEZ, 2006).

O surgimento do gap pode ser explicado de forma análoga ao cristal unidimensional: luz atravessando o material será refratada e parcialmente refletida nas interfaces entre os diferentes materiais (ou entre o material e o ar). O padrão complexo da superposição das ondas irá reforçar ou cancelar uma a outra de acordo com o comprimento de onda da luz, sua direção de propagação através do cristal, o índice de refração dos materiais, e o tamanho e arranjo das estruturas (geometria).

Um exemplo de cristal fotônico bidimensional é um arranjo de colunas dielétricas dispostas numa rede quadrada, como mostra a Figura 2.8. O arranjo é homogêneo na direção  $z$  e periódico no plano  $x$ - $y$  com constante de rede  $a$ .

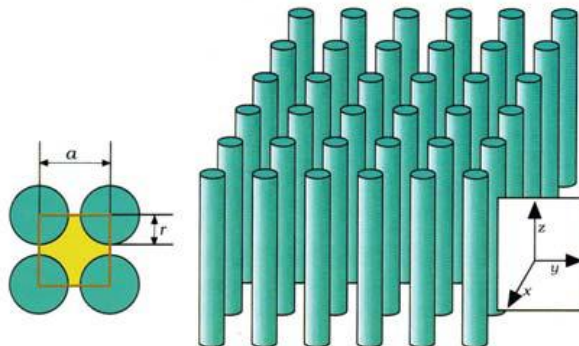


Figura 2.8 – Exemplo de cristal fotônico bidimensional: arranjo em rede quadrada de colunas dielétricas de raio  $r$  e constante dielétrica  $\epsilon$ .

Para certos valores do espaçamento entre as colunas, este cristal pode apresentar um gap fotônico no plano  $x$ - $y$ . Dentro do gap, nenhum modo de propagação é permitido, e a luz incidente é refletida. Enquanto que o cristal unidimensional reflete luz apenas para incidência normal, o cristal bidimensional pode refletir luz incidente para quaisquer direções no plano. Outro exemplo de cristal fotônico bidimensional são as chamadas fibras de cristais fotônicos, detalhadas nas seções seguintes. Fibras ópticas convencionais têm núcleo com alto índice de refração e o confinamento de luz é dado por reflexão interna total. A Figura 2.9, mostra uma das diversas formas de fibras de cristais fotônicos, para a qual, a luz se propaga ao longo de um furo central na fibra, confinada por *band gap* do material de periodicidade bidimensional que envolve o núcleo.

### Cristais Fotônicos tridimensionais

O análogo óptico a um cristal real é um cristal fotônico tridimensional – um dielétrico que é periódico nas três dimensões, Figura 2.6c, pode apresentar PBG para quaisquer direções de incidência da luz, gerando um *band gap fotônico* completo. Cristais fotônicos tridimensionais que apresentam PBG completo são, na realidade, um tanto quanto raros. (CHAM,1990) e (SOUKOULIS, 1990) foram os primeiros teóricos a prever corretamente uma estrutura tridimensional particular que apresentasse um band gap completo (QUIÑÓNEZ, 2006). Tal estrutura consiste de esferas em uma rede do

tipo diamante. Um PBG completo pode ocorrer tanto para esferas dielétricas suspensas no ar quanto para esferas de ar num meio dielétrico, desde que o raio das esferas seja escolhido apropriadamente.

Para projetar um cristal fotônico, seja ele bi ou tridimensional, se faz necessário determinar os parâmetros geométricos da estrutura de forma que ela apresente gap fotônico numa região desejada do espectro. Um cristal é um arranjo espacialmente periódico de átomos ou moléculas. Um elétron viajando por um cristal sente a presença de um potencial também periódico, que determina as propriedades de condução do cristal. Analogamente, podemos pensar em fótons se propagando por um material que apresenta periodicidade na constante dielétrica. Nessa configuração, o potencial periódico é substituído por uma função dielétrica (ou índice de refração) periódica e temos um cristal fotônico.

No caso específico de fibras de cristal fotônico, podemos considerá-las efetivamente como estruturas bidimensionais, uma vez que o comprimento é muito maior que as dimensões transversais. Porém, há uma diferença fundamental entre os cristais fotônicos e as fibras de cristal fotônico: o plano de propagação da luz. Em cristais fotônicos, a luz se propaga no plano do cristal enquanto no interior das fibras, apenas a componente do vetor de onda que é perpendicular ao eixo da fibra sente de fato, a presença da estrutura periódica de índice de refração (CHESINI, 2009). Já as fibras de cristais fotônicos, do inglês, *PhotonicCrystalFibers* – PCF podem ser classificadas em grupos de acordo com o tipo de guiamento, ou seja: Fibras com guiamento por Reflexão Interna Total (RIT), fibras com guiamento por *bandgap* fotônico (PBG) e as fibras com guiamento híbrido, estes tipos fibra serão brevemente discutidas a seguir.

## 2.7 CLASSIFICAÇÃO DAS FIBRAS DE CRISTAIS FOTÔNICOS

É bastante válido enfatizar que o desenvolvimento das fibras de cristais fotônicos, se deu a partir da obtenção dos efeitos ópticos, como por exemplo, o guiamento por banda fotônica que, até então, não eram possíveis de se alcançar com as fibras ópticas convencionais. Neste aspecto as PCS podem ser classificadas da seguinte forma;

✓ PCF com guiamento por RIT

As fibras com guiamento por RIT possuem índice de refração do núcleo maior que o índice de refração médio da casca micro-estruturada. Assim, o princípio de guiamento da luz em seu núcleo é semelhante ao das fibras convencionais. No entanto, essas PCFs podem ser projetadas para apresentar características que não podem ser obtidas em fibras convencionais, como, por exemplo, alto contraste de índice de refração entre núcleo e casca, alta não linearidade (decorrente do alto confinamento em núcleos de 1 $\mu$ m de diâmetro) e deslocamento do zero de dispersão para o visível. Há muita flexibilidade para o projeto dessas fibras, podendo-se alterar o tamanho e a distância entre os buracos da casca, tamanho do núcleo e mesmo sua simetria (OLIVEIRA, 2010).

✓ PCF com guiamento por *band gap* fotônico

As fibras de *band gap* fotônico podem ser construídas criando-se uma região de defeito no cristal, que forma o núcleo da fibra de cristal fotônico onde a luz será confinada. Esse defeito é criado, por exemplo, criando-se um buraco de ar maior, com diâmetro de aproximadamente três vezes o diâmetro dos buracos regulares. O guiamento pelo núcleo se restringirá à faixa de frequências na qual existe o *band gap* (OLIVEIRA, 2010). Uma maneira mais simples de entender o guiamento por *band gap* fotônico em uma fibra é através da óptica geométrica, apresentada na Figura 2.9, considerando as múltiplas reflexões parciais nas interfaces das camadas que compõem o cristal fotônico da casca formada pelas regiões com índice de refração  $n_1$  e  $n_2$ , com  $n_1 < n_2$ . A luz acoplada ao núcleo da fibra (região de defeito da estrutura com índice de refração  $n_1$ ) será parcialmente refletida em cada interface da estrutura, a luz sofre interferências destrutivas (representado pelas linhas mais finas) na região periódica e interferências construtivas no núcleo, sendo dessa maneira confinada a ele.

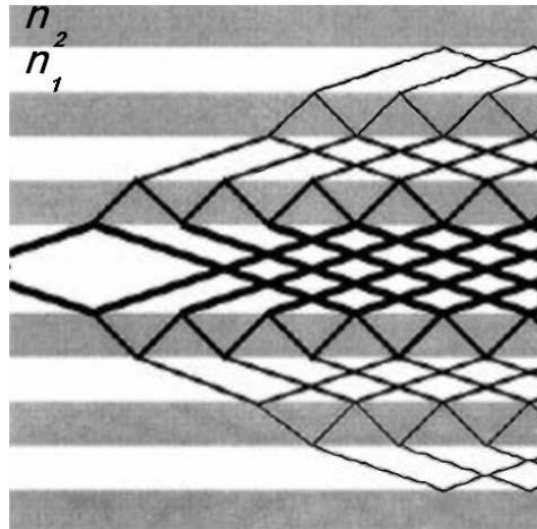


Figura 2.9: Esquema de luz confinada ao núcleo de uma estrutura de cristal fotônico

## 2.8 TECNOLOGIAS EM FIBRAS DE CRISTAIS FOTÔNICOS (PCF)

As pesquisas em novas tecnologias de materiais ampliaram as possibilidades de se manipular a luz, controlando-a em cavidades e guias através de um novo mecanismo, conhecido como efeito *photonic band gap* (PBG). O efeito PBG se manifesta em materiais com estrutura periódica, onde a periodicidade é da ordem de grandeza do comprimento de onda óptico. Tais estruturas periódicas são na maioria das vezes chamadas de cristais fotônicos, ou estruturas *photonic band gap*. Escolhendo-se adequadamente a estrutura do cristal, as dimensões da rede periódica e as propriedades dos materiais constituintes, a propagação da onda eletromagnética em determinadas bandas de frequência pode ser proibida. Esta característica de inibir a propagação de fótons com frequências bem definidas pode ser comparada com as propriedades eletrônicas dos semicondutores. Além disso, a escalabilidade das propriedades das ondas eletromagnéticas nos cristais fotônicos permite que eles sejam explorados em todo o espectro eletromagnético, sendo possível abranger frequências ópticas e de micro-ondas.

Por possuir periodicidade bidimensional no plano perpendicular ao eixo do guia, e permanecer invariante no sentido de propagação da onda, as fibras ópticas são casos específicos do uso de cristais fotônicos com o intuito de manipulação da luz. Sendo, portanto, conhecidas como Fibras de Cristal Fotônico. As PCFs podem ser classificadas

quanto à maneira de propagação da luz em dois tipos: *high-index guiding e photonic band gap* (BEZERRA, 2009).

✓ PCF *High-index guiding*

Este tipo de PCF propaga o sinal por meio de um núcleo com índice de refração maior que o da casca, explorando o mecanismo de índice de reflexão interna total (RIT). Esta diferença no índice de refração é obtida pela presença de furos de ar ao redor do núcleo, criando uma área de alto índice de refração no centro da fibra e uma área de menor índice onde há a presença dos furos.

✓ PCF *photonic band gap*

Neste tipo de PCF, o núcleo possui um índice de refração menor que o da casca, utilizando-se da presença de estruturas do tipo PBG, onde para certos comprimentos a luz não pode ser propagada.

Em 1996, o físico irlandês Philip Russel fez a primeira demonstração prática de uma fibra do tipo PCF. Porém, nos últimos anos, as tecnologias de PCFs evoluíram sem parar com a grande contribuição de grupos de estudo brasileiros (OLIVEIRA, 2002). As PCF se enquadram nos modelos de estruturas dielétricas que possuem propriedades no guiamento do sinal, propriedade esta, que raramente se entra em uma fibra convencional. As PCFs, geralmente são constituídas de vidro transparente com núcleos finos em sílica. A construção de um cristal fotônico requer a criação de uma estrutura periódica no material dielétrico, como mostra a Figura 2.10.

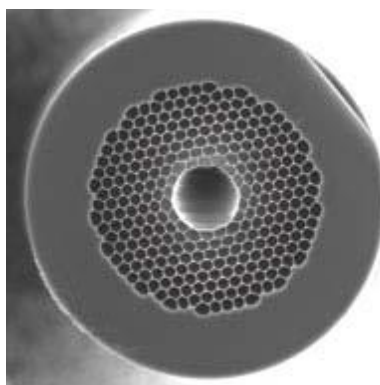


Figura 2.10 – Seção transversal de uma PCF bidimensional que utiliza o princípio PBG para o guiamento de luz.



Alguns trabalhos, como (DA SILVA, 2003a,b, 2010, 2011a) e (SPADOTI, 2007), mostram a manipulação de configuração das estruturas de dispositivos ópticos, com o intuito de modificar suas propriedades de acordo com o interesse em questão. Isso é possível através do uso de cristais fotônicos, oferecendo certo controle sobre a propagação da luz. Tais cristais são empregados em diversos dispositivos, a exemplo das fibras ópticas, o que conduz ao processo característico das Fibras de Cristal Fotônico.

✓ Modelagem de uma PCF

Para se modelar matematicamente uma PCF, podem-se utilizar vários métodos numéricos, porém, neste trabalho utilizou-se o método dos elementos finitos. Neste caso, uma atmosfera computacional foi criada com a finalidade de aplicação do método. É importante salientar, que para o processo de simulação, camadas perfeitamente casadas do inglês *Perfect Matched Layer* (PML) (BERENGER, 1994), foram utilizadas com a finalidade de truncar o domínio computacional, sem o risco do indesejado processo de reflexão do sinal ao se chocar com as paredes do contorno. Para isso, as PMLs absorvem todo sinal que chega à região delimitada por elas, por possuírem paredes absorventes. O uso da PML reduz drasticamente o esforço computacional através da absorção das ondas eletromagnéticas que incidirão na superfície da mesma, o que representa uma grande vantagem, visto que o Método dos Elementos Finitos, do inglês *Finite Element Method* (FEM), utilizado na simulação dos modelos, consiste na geração de malhas com elevado número de elementos que podem ser triângulos, para modelos 2D, e tetraedros, para modelos 3D. Logicamente, quanto menor o espaço amostral, menor o número de elementos e mais rápida a simulação, por redução do esforço computacional.

A Figura 2.11 mostra o domínio computacional de uma estrutura envolvida por camadas perfeitamente casadas (PML), onde a região de guiamento é representada pelo núcleo em branco no centro da estrutura.

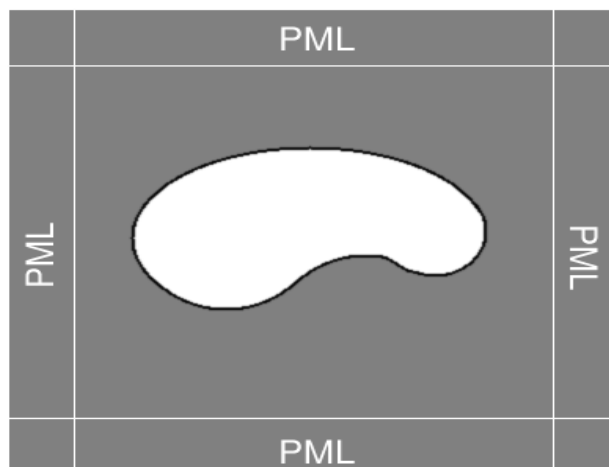


Figura 2.11: Exemplo de uma estrutura envolvida por PML na modelagem por elementos finitos.

Ao contrário das fibras ópticas convencionais, que são feitas a partir de óxido de silício ultra puro, utilizando dopagem para alteração de suas características, as fibras ópticas fotônicas têm suas características definidas por microestruturas construídas em seu interior.

As PCFs são fibras micro-estruturadas onde os furos de ar estão dispostos de maneira periódica, assemelhando-se com cristais, embora não exista uma nomenclatura bem estabelecida. A Figura 2.12, mostra diferentes modelos PCFs, formadas por furos de ar equidistantes aos seus vizinhos podendo estar dispostos em diversas geometrias. A distância entre um furo e seu vizinho é chamada de *pitch* ( $\Lambda$ ), o diâmetro dos furos,  $d$ , pode variar ou não entre anéis. E, por fim, o núcleo por ser sólido (*solid-core*), pode ser um núcleo vazio, preenchido por ar, ou ainda preenchido por gases ou líquidos (*hollow-core*). Quanto à classificação das fibras de cristais fotônicos, elas podem ser divididas em duas categorias básicas que são as fibras de cristal fotônico com núcleo oco e as fibras de cristal fotônico com núcleo sólido (SANTOS, 2007).

## 2.9 FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO COM NÚCLEO SÓLIDO

A PCF de núcleo sólido é composta geralmente de um núcleo de sílica com apenas alguns microns de diâmetro, envolto por uma casca com uma matriz de buracos periodicamente distribuídos que percorrem longitudinalmente todo o seu comprimento, conforme pode ser observado na Figura 2.12.

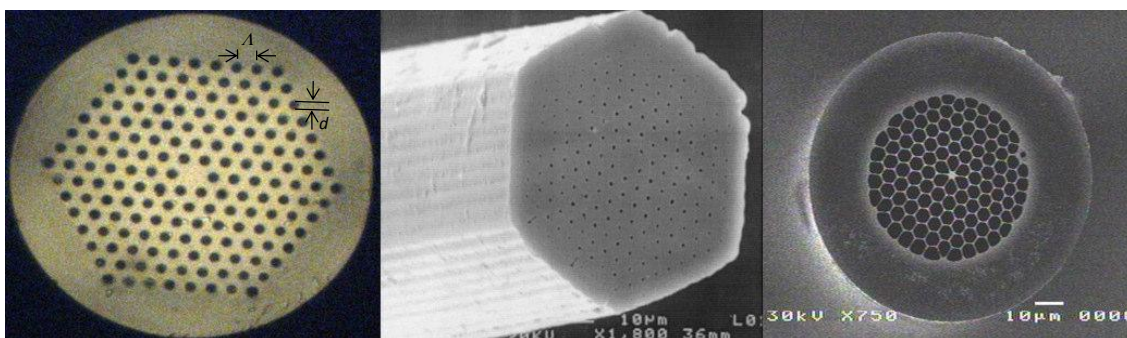


Figura 2.12: Diferentes estruturas de PCF de Núcleo sólido (SANTOS, 2007)

Devido os buracos da casca micro-estruturada ser preenchidos por ar e o núcleo da fibra ser sólido e composto de sílica, a luz tende a se propagar nesse tipo de fibra geralmente por reflexão interna total. Isso ocorre porque a casca se comporta como se apresentasse um índice de refração efetivo correspondendo a uma média entre os índices de refração do ar e da sílica. Desse modo, é possível fabricar uma casca com uma alta fração de ar, que apresente um índice muito próximo de 1, fazendo com que se tenha uma grande diferença entre os índices do núcleo e da casca. Isto, em conjunto com a fabricação de um núcleo extremamente pequeno, irá levar a áreas modais igualmente pequenas e gerar efeitos não-lineares com alta eficiência. Também é possível introduzir materiais como líquidos ou gases nos micro-buracos da casca de uma PCF de núcleo sólido. Se esses materiais introduzirem um índice de refração efetivo de casca menor que o índice de refração do núcleo, a luz se propaga por reflexão interna total.

Em Telecomunicações, as fibras PCF de núcleo sólido podem ser utilizadas como compensadores de dispersão devido à microestrutura da casca permitir alto grau de controle da dispersão cromática de guia de onda. Outra possibilidade é o emprego dessas fibras como amplificadores ópticos, onde o núcleo da fibra é dopado com um elemento químico, como por exemplo, Germânio (Ge), e a microestrutura permite a propagação multimodo do bombeamento e monomodo do sinal.

### ✓ Fibras de Cristal Fotônico com Núcleo Oco

As PCFs, com núcleo oco, Figura 2.13, são semelhantes às PCFs de núcleo sólido, no que se refere à casca constituída de uma matriz de micro-buracos. Entretanto, neste caso o núcleo é constituído de um buraco com dimensão maior do que a dos buracos da casca, por esse motivo, na PCF de núcleo oco é possível introduzir líquidos ou gases diretamente no núcleo.

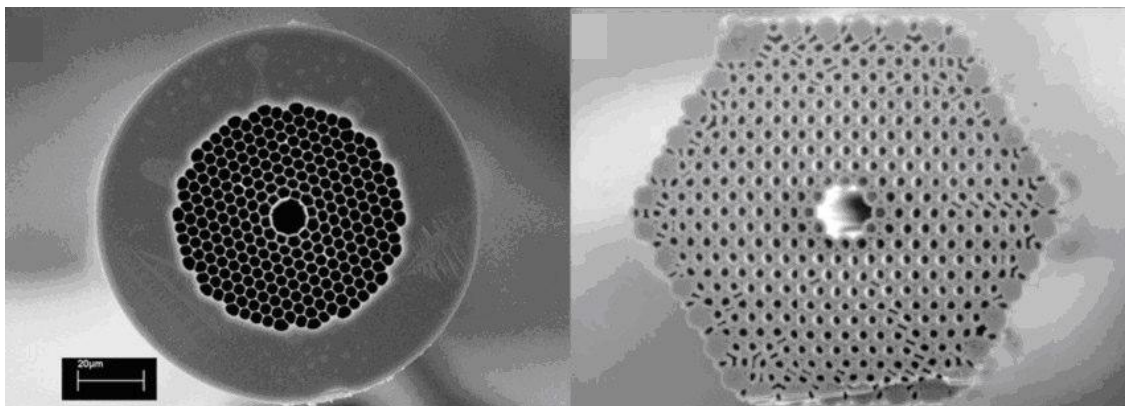


Figura 2.13: Diferentes estruturas de Fibras de Cristal Fotônico com Núcleo Oco (BEZERRA, 2009)

### ✓ Confinamento da Luz em Fibras de Cristal Fotônico

Em fibras ópticas tradicionais o guiamento da luz é feito por reflexão interna total, para tanto, geralmente se dopa o núcleo com algum tipo de material, como, por exemplo, germânio, flúor ou outros, a fim de fazer com que o índice de refração do mesmo seja levemente superior ao da vizinhança. As fibras de cristal fotônico geralmente são feitas a partir de um único material, ou seja, não há dopantes na região do núcleo. Entretanto, a presença de buracos de ar reduz o índice de refração efetivo da casca, composta de vidro e ar, fazendo com que este seja inferior ao índice do núcleo, composto apenas por vidro. Alternativamente, pode-se pensar que, em vez do núcleo, a casca foi dopada, porém, com material de baixo índice de refração, no caso ar.

Nos últimos anos, alguns modelos de PCFs constituídas a partir de sílica dopada com germânio, têm sido estudadas (Da Silva, 2010) com intuito de se utilizar este modelo de PCF para correção de dispersão cromática. Neste sentido, torna-se necessário uma análise minuciosa do guiamento da luz na região do centro da fibra, visto que a luz é

não poderá ser guiada pelo efeito de *band gap* fotônico, para não inibir a propagação em da luz no comprimento de onda desejado. Isto é, a propagação da luz dentro do espectro de transmissão óptica, não poderá ser inibida devido o efeito *band gap* fotônico. Entretanto, caso esse efeito não possa ser evitado, a presença de um defeito na estrutura do cristal (no caso o núcleo sólido ou oco) poderá ser usado para garantir que a frequência desejada seja propagada dentro da região de *band gap* fotônico.

## 2.10 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO

No que se refere a construção de PCFs, ou seja, processo de confecção de pré-formas, os métodos mais utilizados são os de pré-forma construídas a partir dos método furação, método de extrusão e método de empilhamento.

### ✓ Método Furação

Conforme o próprio nome indica, o método de furação consiste em desenhar a estrutura desejada fazendo furos controlados por toda a pré-forma da fibra. A Figura 2.14 mostra uma pré-forma em processo de fabricação e alguns exemplos de pré-formas prontas para serem levadas à torre de puxamento.

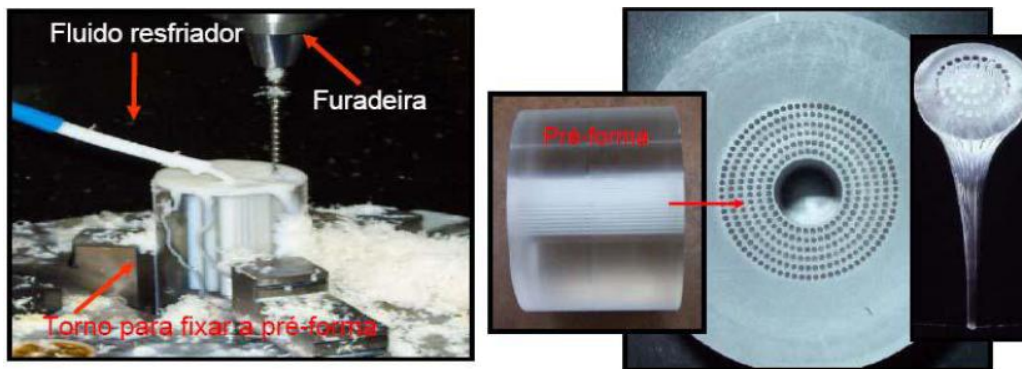


Figura 2.14: Processo de fabricação de pré-formas por furação e algumas pré-formas prontas para serem levadas à torre de puxamento

Este processo é mais indicado para fabricação de fibras plásticas, dada a dificuldade em se furar vidro sem comprometer toda a estrutura. Ainda, existe um limite físico para o tamanho mínimo da pré-forma, dado pela resolução da furadeira.

## ✓ Método de Extrusão

Neste método cria-se uma máscara com o negativo no padrão desejado para a fibra. O processo consiste no amolecimento, ou seja, na fundição de uma pequena amostra de material, que pode ser vidro ou plástico, para ser pressionada contra a máscara. Para essa forma de puxamento, deve-se desenvolver uma pré-forma com a geometria moldada pela máscara já fabricada como mostra a Figura 2.15 (CHESINI, 2009). A grande desvantagem desse método é que praticamente não há materiais para confecção de máscaras que resistam à alta temperatura de processamento da sílica sem que haja contaminação. Além disso, o tamanho das pré-formas fabricadas é reduzido.



Figura 2.15: Esquema da fabricação de pré-formas por extrusão e tamanho típico da pré-forma fabricada

## ✓ Método de Empilhamento

Esse método consiste em fabricar, primeiramente, capilares ou bastões sólidos de diâmetros da ordem de poucos milímetros. Em seguida, esses tubos são empilhados de modo a formarem a estrutura final da fibra, porém em versão macroscópica, num processo que requer habilidade e paciência.

A Figura 2.16a, mostra um esquema do empilhamento de uma fibra de núcleo sólido, com os tubos representando os buracos periódicos e o bastão o núcleo sólido, e 2.16b uma foto de uma pré-forma real já empilhada e com uma jaqueta de vidro.

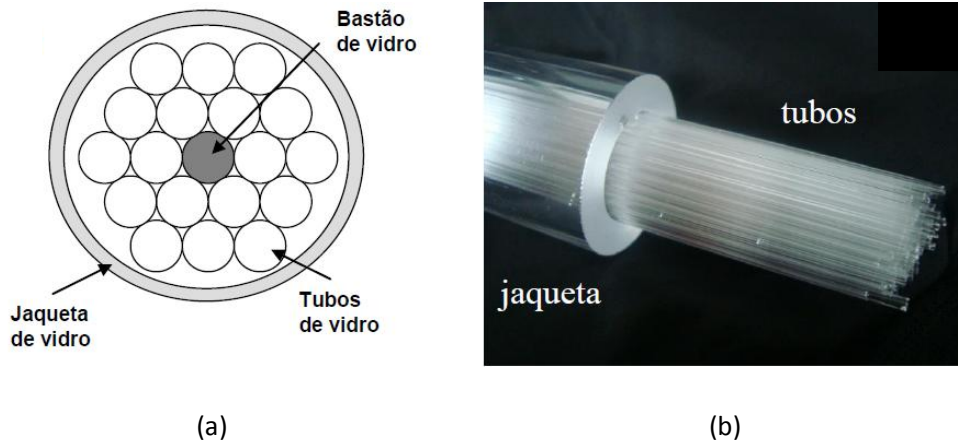


Figura 2.16: (a) Esquema do empilhamento da pré-forma (b) pré-forma empilhada.

Este método é o mais utilizado na fabricação de fibras de cristal fotônico, justamente por não haver problemas de contaminação da pré-forma, como no caso da extrusão. Há ainda, maior controle dos parâmetros geométricos da fibra como, por exemplo, o tamanho e a distância entre os buracos. A desvantagem é que, nesta técnica, estamos limitados a geometrias hexagonais.

## 2.11 CONCLUSÃO

Neste capítulo, foi apresentado um estudo sobre as fibras ópticas, e uma introdução alguns novos modelos de fibras micro-estruturadas baseadas em cristais fotônicos. O objetivo principal deste capítulo foi mostrar a concepção de um novo modelo de fibra, conhecida como fibra de cristal fotônico, que é usada como estrutura principal do desenvolvimento do acoplador óptico baseado em PCF.

## Capítulo 3 - Proposta do trabalho

O objetivo geral deste trabalho é a utilização do método da propagação vetorial de feixes (VBPM), incluindo camadas perfeitamente casadas, do inglês *Perfectly Matched Layer* (PML), do tipo cilíndricas, com base numa abordagem por Algoritmo Genético, para a obtenção do acoplamento entre duas fibras com índice degrau de núcleo furado, do inglês *Step Index Holey Fiber* (SIHF). Este trabalho também aborda a aplicação do VBPM na obtenção e análise de um novo modelo de fibra óptica baseada quase cristais fotônicos usando uma matriz não periódica com repetição 6 e 12 vezes.

Para o atendimento ao objetivo geral, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Familiarização com as metodologias de utilização de AGs, VBPM e fibras ópticas baseadas em quase cristais fotônicos.
- Utilizar o VBPM em conjunto com AG de busca inicial a ser utilizado para os parâmetros da fibra óptica do SIHF.
- Aplicar o Algoritmo Genético com a proposta de uma função *fitness* que forneça desempenho satisfatório à resposta do VBPM.
- Uma vez obtidas as etapas anteriores, aplicar o VBPM na obtenção uma Fibra com Quase Cristal Fotônico (FQCF) com dispersão plana para as configurações com 6 e 12 repetições.

Objetivando o cumprimento dos objetivos específicos propostos para o desenvolvimento do trabalho, é descrita na Seção 3.1 a caracterização do problema a ser estudado e em seguida (Seção 3.2 a 3.4), detalhados o processo de aplicação do método utilizado.



### 3.1 Caracterização do Problema - Projeto do Acoplador

O perfil do índice de refração da SIHF, utilizado para construir o acoplador é mostrado na figura 1a, e as constantes de propagação normalizadas dos dois primeiros modos desta fibra com parâmetros  $\eta_1 = 1,05214$ ,  $\eta_2 = 1,0$ ,  $r_1 = 0,2 \mu\text{m}$  e  $r_2 = 1,8 \mu\text{m}$  otimizados através GA (DA SILVA, 2010) são mostradas na Figura 1b. Neste trabalho, foi analisado um acoplador constituído por dois e três núcleos, como mostrado nas figuras 2a e a fig. 2b, respectivamente, separados por distância  $\ell$  distância, onde  $n_c$  e  $n_s$  representam o índice de refração dos núcleos e do revestimento (casca), respectivamente. Em adição,  $n_c$  é o índice de refração da sílica pura e  $n_s$  é o índice de refração de sílica dopada com germânio.

O perfil de índice de refração  $n(r, \lambda)$  de uma fibra óptica pode ser escrito como  $n(r, \lambda) = \eta(r)\eta(\lambda)$ , na qual  $n(\lambda)$  representa o índice de refração em função do comprimento de onda e  $\eta(r)$  é o perfil do índice de refração normalizado, que é função apenas da coordenada radial. Deste modo, o índice de refração do núcleo perfurado é normalizado em relação ao índice de refração da sílica pura e da sílica dopada com germânio.

Além disso,  $r_1$  e  $r_2$  representam o raio do furo ar e do núcleo sólido, respectivamente. Na análise feita nesse trabalho,  $n = 1,0$  para o furo no centro núcleo das fibras que formam o acoplador e  $\eta(r)$  é o fator normalizado referente à região externa ao furo central presente no núcleo das fibras. Os coeficientes *Sellmeier* para sílica pura e para a sílica dopada com germânio,  $n(\lambda)$  são obtidos em função do comprimento de onda e são inseridos diretamente na formulação usada pelo VBPM.

Para especificar teoricamente um material utilizado no espectro óptico, o índice de refração é dependente do comprimento de onda e é comum a utilização da equação de Sellmeier (BUCK, J. A, 1995) dada por:

$$n(\lambda) = \left( 1 + \sum_{i=1}^m A_i \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Para  $m = 3$  na equação (1), é possível obter-se apenas três termos que caracterizam o índice do meio considerando seis comprimentos de onda diferentes. Desta forma, é possível calcular seis constantes de Sellmeier  $A_1, A_2, A_3, \lambda_1, \lambda_2$  e  $\lambda_3$  para sílica pura e

sílica dopada com germânio. Através destas constantes, podemos obter uma aproximação para a curva de dispersão (XIN, 2007).

Neste trabalho, o valor encontrado, utilizando AG foi de  $\eta(r) = 1,05214$ . Esse foi utilizado em todas as simulações para obter os índices de refração da região de guiamento da SIHF. A partir do valor obtido para  $\eta(r)$  foram encontrados valores para o índice de refração eficaz ( $n_{\text{ef}}$ ) do modo fundamental da fibra. A figura 3.1b, mostra valores aceitáveis de  $n_{\text{ef}}$ , em função da variação do comprimento de onda.

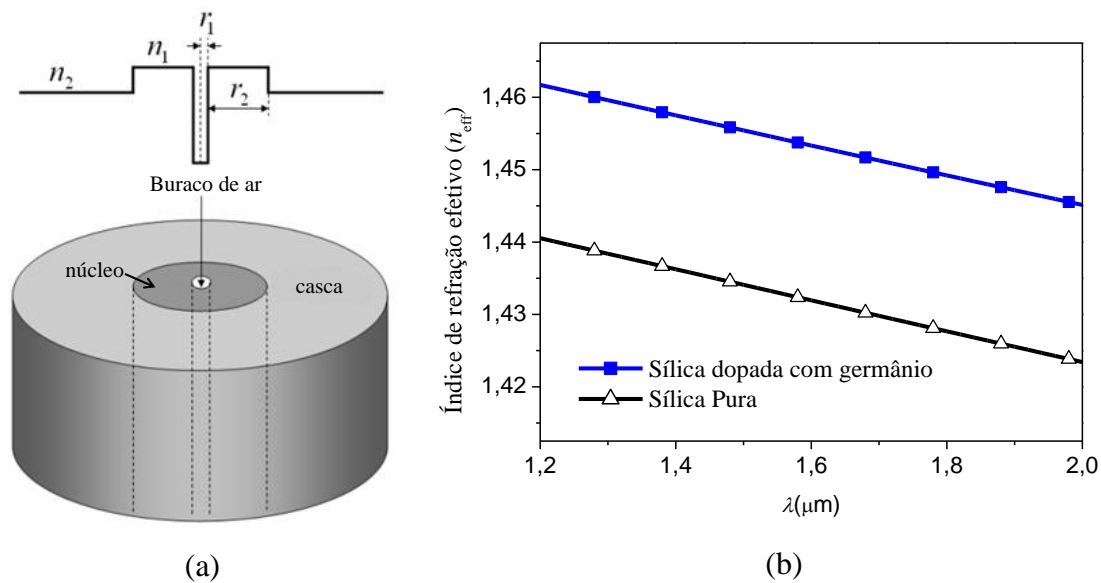


Figura 3.1: (a) Perfil de índice de refração da SIHF e (b) constantes de propagação normalizada para o modo fundamental da SIHF considerando  $\eta_1 = 1.05214$ ,  $\eta_2 = 1.0$ ,  $r_1 = 0.2 \mu\text{m}$  e  $r_2 = 1.8 \mu\text{m}$ .

As figuras 3.2a e 3.2b mostram a seção transversal do acoplador constituído de duas SIHF, com dois e três núcleos, respectivamente. Os núcleos são indicados pelos números 1, 2 e 3, e as suas posições foram escolhidas de forma a manter a simetria da estrutura. A distância entre os condutores 1, 2 e 3 é constante ao longo da direção de propagação. Nessa análise, em primeiro lugar, o sinal é lançado no núcleo 1 e o acoplamento é verificado no núcleo 2. Em seguida, considerando a estrutura com três núcleos, o sinal lançado no núcleo 1 e o acoplamento é verificado nos núcleos 2 e 3. O tamanho do furo de ar localizada no centro de cada núcleo pode ser obtido e otimizado em função do coeficiente de acoplamento horizontal através utilizando AG.

Para todos os cálculos numéricos, o material que constitui os núcleos, é a sílica dopada com germânio com índice de refração representado por  $n_c$ . Os núcleos são

imersos em um revestimento com índice de refração constituída por pura sílica representada por  $n_s$ .

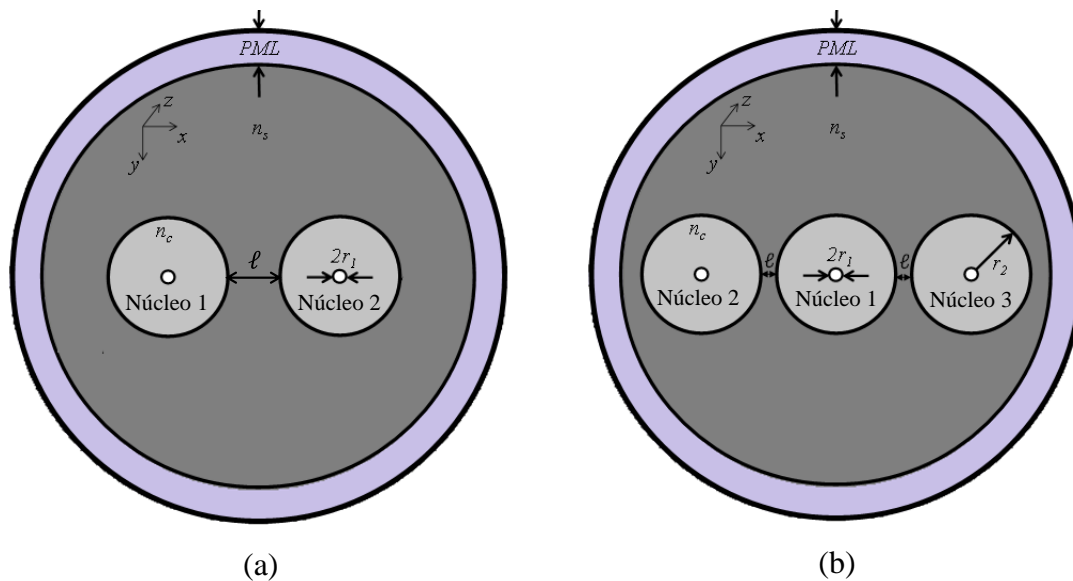


Figura 3.2: Acoplador constituído por: (a) SIHF com dois núcleos e (b) SIHF com três núcleos.

### 3.2 Algoritmo Genético

Para o SIHF mostrado na figura 3.1, os parâmetros otimizados foram  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $r_1$  e  $r_2$ , onde  $\eta_1$  e  $\eta_2$  representam o índice de refração normalizada do núcleo e o índice de refração do revestimento (casca da fibra), respectivamente. Os parâmetros da estrutura em questão pertencem ao conjunto dos números reais, podendo assumir, com facilidade, partes fracionárias. Devido a esta característica, uma possível forma de codificação binária seria aumentar o número de bits necessários para representar todo o cromossomo, esse processo poderia exigir um maior esforço computacional na tarefa contínua de codificação, decodificação e correção de valores. Assim, decidiu-se adotar valores de codificação de forma a preservar o tipo de variáveis otimizadas.

Para dar início ao ciclo de vida do algoritmo genético, o vetor que representa a população com novos indivíduos (cromossomos) é ajustado antes de gerar os novos cromossomos. Dessa forma, o código computacional necessário para definir todos os valores possíveis para cada gene é atualizado e a nova população de cromossomo é avaliada como apresentado na figura 3.3.

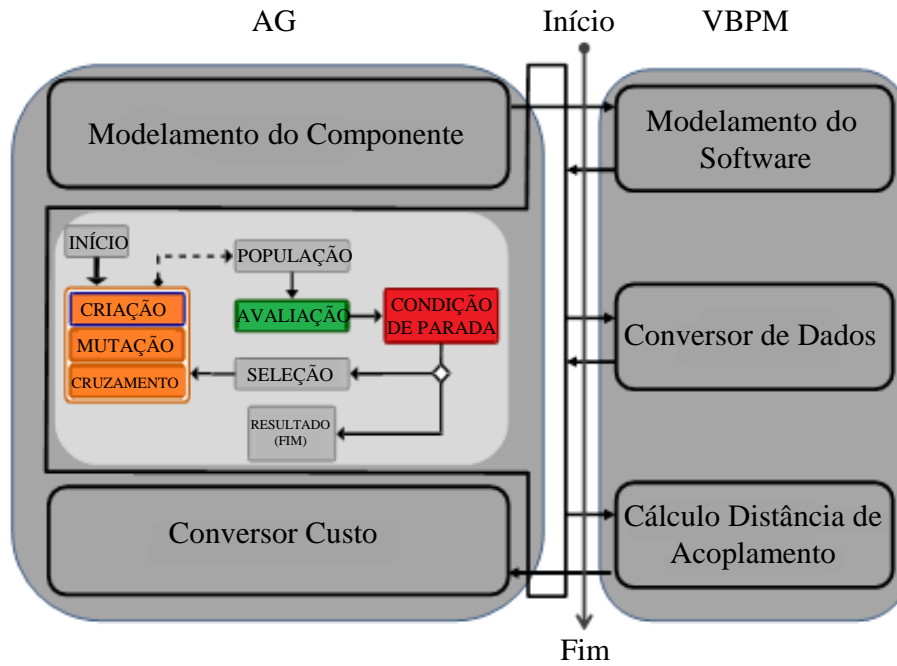


Figura 3.3: Estágios da evolução da população de cromossomos.

Neste trabalho, a SIHF é usada no desenvolvimento de um novo modelo de acoplamento óptico baseado na aplicação de duas e três modelos destas fibras. Para avaliar cada configuração de fibra óptica, usamos um código computacional externo para encontrar os valores próprios. Este código é executado pouco antes da função custo do AG e a saída é um arquivo de dados que depois é processado para se obter a dispersão cromática em função do comprimento de onda. Como qualquer outro método de otimização, algoritmos genéticos têm seu desempenho relacionado não apenas às suas funções internas, mas também na arquitetura do computador utilizado, uma vez que com uma maior capacidade de processamento, um maior número de indivíduos, poderá ser avaliado considerando um mesmo período de tempo. Neste estudo foi utilizado um sistema operacional Windows 7 compilado para tirar proveito da instrução de 64 bits de uma arquitetura presente em processador Pentium Core i7 com 6 GB de RAM. A função custo é um código simples que lê o arquivo e cria um arquivo de dispersão cromática em uma matriz de ordem 2. A primeira coluna da matriz representa o comprimento de onda e a segunda coluna representa a dispersão cromática. Em seguida, o algoritmo cria duas variáveis para armazenar os valores máximo (MAX) e mínimo (MIN) para a dispersão cromática. Neste trabalho, o AG foi utilizado uma dispersão plana e próxima de zero, ou seja, dispersão cromática nula. Após o cálculo da dispersão

cromática, o modelo de fibra usado e aplicado na construção dos acopladores mostrados na figura 2.

### 3.3 Introdução a Formulação por Elementos Finitos

No desenvolvimento desse trabalho, o método dos elementos finitos foi utilizado no desenvolvimento do código computacional utilizado para simular as estruturas analisadas. Esse método é amplamente reconhecido como uma poderosa ferramenta numérica para análise de dispositivos ópticos (DA SILVA, 2003). A aproximação por elementos finitos vetoriais para análise das características de propagação em fibras ópticas com alta precisão vem sendo estudadas e aplicadas com sucesso em vários modelos de estruturas. Neste aspecto, em sistemas de comunicações que envolvem fibras ópticas, o conhecimento da dispersão cromática  $D$  torna-se extremamente importante para determinar a qualidade da transmissão do pulso, devido este fator ser diretamente responsável pela largura do pulso. Por outro lado,  $D$  é proporcional à derivada de segunda ordem do índice de refração efetivo  $n_{eff}$ . Desta forma, uma ferramenta numérica altamente precisa como o método dos elementos finitos, torna-se necessário para obter o índice de refração efetivo,  $n_{eff}$ .

Em adição, além da aplicação do método numérico baseado em elementos finitos, os coeficientes de Sellmeier, são usados na formulação para analisar a dispersão cromática, a variação do índice efetivo e a área efetiva do modo fundamental em diferentes frequências. Os coeficientes de Sellmeier são aplicados diretamente na formulação vetorial, que em síntese é obtida partindo-se da equação vetorial de Helmholtz em duas dimensões e considerando camadas perfeitamente casadas (PMLs), do tipo cilíndrico, para evitar reflexões indesejadas. Desta forma, pode-se escrever:

$$\nabla \times \left( \bar{\bar{k}} \nabla \times \bar{H} \right) - k_0^2 \bar{H} = 0 \quad (2)$$

Onde  $\bar{\bar{k}} = 1/(\bar{\bar{\epsilon}}L)$ , e  $\bar{\bar{\epsilon}}$  representa o tensor permissividade relativa e  $\bar{L}$  é um tensor relativo aos parâmetros da PML cilíndrica. Considerando o meio dielétrico com anisotropia transversal e definindo  $\hat{u}_x$ ,  $\hat{u}_y$ ,  $\hat{u}_z$  associados com as direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  respectivamente,  $\bar{\bar{\epsilon}}$  pode ser escrito como  $\bar{\bar{\epsilon}} = \epsilon_{xx} \hat{u}_x \hat{u}_x + \epsilon_{yy} \hat{u}_y \hat{u}_y + \epsilon_{zz} \hat{u}_z \hat{u}_z$

e  $\bar{L}$  como  $\bar{L} = L_{xx}\hat{u}_x\hat{u}_x + L_{yy}\hat{u}_x\hat{u}_y + L_{yx}\hat{u}_y\hat{u}_x + L_{yy}\hat{u}_y\hat{u}_y + L_{zz}\hat{u}_z\hat{u}_z$ . Após algumas manipulações algébricas e assumindo que tanto o meio como os campos variam muito lentamente ao longo da direção de propagação,  $z$ (DA SILVA, 2003), a equação (2) poderá ser reescrita como:

$$[A]\{\phi\} = n_{eff}^2 [B]\{\phi\} \quad (3)$$

onde  $[A]$  e  $[B]$  são matrizes esparsas e complexas. A equação (3) é eficientemente resolvida através do método da interação de subespaços. É importante ressaltar que o perfil de índice de refração  $n(r, \lambda)$  de uma fibra óptica pode ser escrito como  $n(r, \lambda) = \eta(r)n_s(\lambda)$ , onde  $n_s(\lambda)$  é o índice de refração da sílica pura e  $\eta(r)$  é o índice de refração normalizado, o qual é função apenas da coordenada radial.

Aqui, as constantes de Sellmeier para o índice de refração da sílica  $n_s(\lambda)$  dadas em (BUCK, J. A, 1995) são consideradas em termos dos seus percentuais de dopagem. Desta forma, a dispersão do material é incluída diretamente nos cálculos. O uso dos coeficientes de Sellmeier, nesse tipo de análise numérica, justifica-se devido a sua capacidade de se ajustar a medidas experimentais dos índices de refração da sílica pura e suas variações que incluem percentuais de dopagem. Aqui,  $n_{eff}$  é obtido a partir da equação (2), aplicada para uma determinada faixa de comprimentos de onda, para a qual, o cálculo da dispersão cromática em função do comprimento de onda, pode ser diretamente obtido a partir da seguinte expressão:  $D = -(\lambda/c)(d^2 n_{eff} / d\lambda^2)$ , onde  $c$  representa a velocidade da luz no espaço livre e  $\lambda$  o comprimento de onda.

### ✓ Camadas Perfeitamente Casadas do Tipo Cilíndricas (CPML)

Para efeito de aplicação Na Figura. 3.4a,  $A$  é a distância entre os centros de cada buraco de ar (*pitch*) e  $d$  representa o diâmetro dos buracos de ar. Na Figura 3.4b, a região mais externa representa a camada de CPML com uma espessura  $d_{CPML} = 1 \mu\text{m}$ , na Figura 3.2 a região com camadas perfeitamente casadas está representada por PML. As camadas perfeitamente casadas são utilizadas como ferramenta matemática para delimitar o domínio computacional. Na formulação apresentada na seção anterior, os parâmetros relativos às CPML, são diretamente introduzidos através do tensor  $\bar{L}$ . A CPML, usada na formulação do método, foi implementada como em (DA SILVA,

2013), onde o esquema utilizado é obtido em coordenadas cartesianas e os elementos do tensor  $\bar{\bar{L}}$ , são representados em termos das coordenadas cilíndricas  $(\rho, \varphi, z)$ . Desta forma, o tensor  $\bar{\bar{L}}$  é dado por:

$$\bar{\bar{L}} = \begin{bmatrix} S_z \left( \frac{S_\varphi}{S_\rho} \cos^2 \varphi + \frac{S_\rho}{S_\varphi} \sin^2 \varphi \right) & S_z \cos \varphi \sin \varphi \left( \frac{S_\varphi}{S_\rho} - \frac{S_\rho}{S_\varphi} \right) & 0 \\ S_z \cos \varphi \sin \varphi \left( \frac{S_\varphi}{S_\rho} - \frac{S_\rho}{S_\varphi} \right) & S_z \left( \frac{S_\varphi}{S_\rho} \sin^2 \varphi + \frac{S_\rho}{S_\varphi} \cos^2 \varphi \right) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{S_\rho S_\varphi}{S_z} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Onde  $S_\varphi$ ,  $S_\rho$  e  $S_z$  são variáveis relativas ao sistema de coordenadas cilíndricas.  $S_\varphi$  e  $S_z$  são escolhidos para assumir o valor 1 em todas as regiões analisadas e  $S_\rho$  assume a seguinte forma:

$$S_\rho(\rho) = \begin{cases} 1 & , \rho \leq \rho_{PML} \\ 1 - i\alpha \left( \frac{\rho - \rho_{PML}}{d_{PML}} \right)^2 & , \rho > \rho_{PML} \end{cases} \quad (5)$$

Onde  $\rho_{PML}$  é o raio interno da região constituída por PML,  $\alpha$  é o coeficiente de reflexão,  $d_{PML}$  é a espessura da PML e  $\rho$  corresponde a variação do raio total da PCF em análise.

### 3.4 Projeto da PCQF

A Figura 3.4a mostra a matriz não periódica usada na obtenção da Figura 3.4b que mostra a seção transversal da PQCF com simetria doze vezes, proposta neste trabalho. Na região central, ou seja, no núcleo da fibra, o furo de ar é substituído por sílica dopada com germânio. Para todos os cálculos numéricos, o índice de refração do material que constitui a região sem os buracos de ar, é o da sílica dopada com germânio, obtido através das equações de Sellmeier (BUCK, J. A, 1995). Estudos preliminares mostram que a dispersão, para a estrutura em análise, é plana sobre as bandas  $E + S + C + L$ . Para obtenção do modo fundamental da PQCF, os cálculos numéricos foram efetuados considerando um comprimento de onda de 1,55  $\mu\text{m}$ .

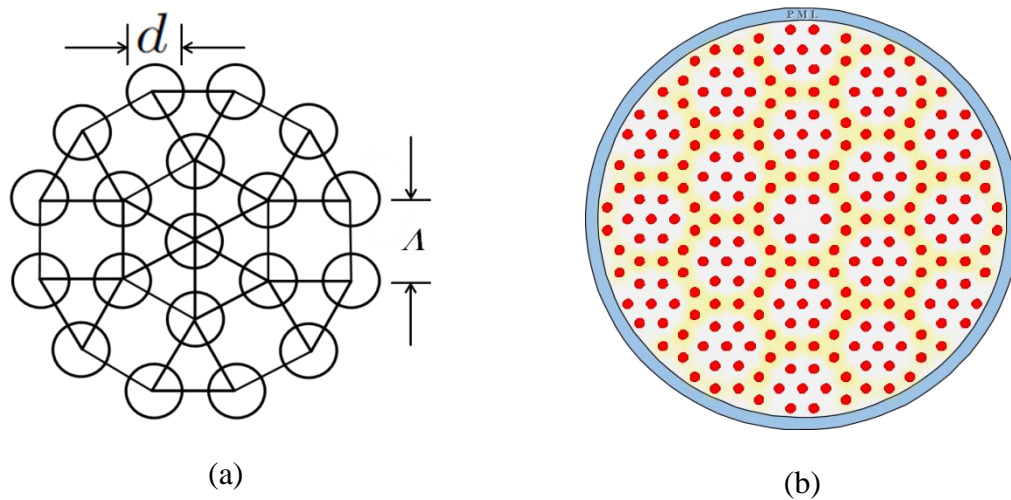


Figura 3.4: (a) Estrutura de quase cristal fotônico e (b) Seção transversal da fibra de quase cristal fotônico com simetria 12 vezes.

Estruturas quase periódicas, do tipo quase cristais, são estruturas únicas que podem apresentar longo alcance na direção de propagação, mantendo a simetria, porém sem periodicidade. Recentemente, estudos verificaram que as estruturas quase periódicas podem dar origem a fenômenos importantes e propriedades que não são observadas em estruturas periódicas (SOAN KIM, 2009). Por exemplo, uma introdução de simetria 12 vezes em quase cristais, através de buracos de ar, em uma matriz dielétrica com índice de refração baixo, pode originar *gaps* fotônicos, ou seja, faixas de frequência em que a propagação da luz é totalmente proibida, enquanto que em cristais fotônicos isso não ocorre (LI YU-HE, 2010). Neste trabalho, verifica-se o comportamento da dispersão cromática em função dos parâmetros estruturais da fibra mostrada na Fig. 3.4b. Inicialmente, para obtenção da dispersão cromática, fixamos o valor de  $d/A = 0,31$  e variamos o diâmetro dos furos de ar  $d = 0,70 \mu\text{m}$ ,  $d = 0,75 \mu\text{m}$ ,  $d = 0,77 \mu\text{m}$  e  $d = 0,80 \mu\text{m}$ . Em seguida, o valor de  $d$  foi mantido constante em  $0,75 \mu\text{m}$ , enquanto o valor da relação  $d/A$  sofreu uma variação de  $\pm 0,10$ , ou seja,  $d/A = 0,31 \pm 0,10$ . É importante destacar que uma redução na relação  $d/A$ , com o  $d$  fixo, implica no aumento do  $A$ , representando um incremento na espessura da fibra e um aumento na relação  $d/A$ , com  $d$  fixo, implica numa diminuição do  $A$ , representando um decréscimo na espessura da fibra.

Assim como as fibras de cristais fotônicos, as PQCF podem suportar um único modo de propagação, isso faz com que algumas geometrias sejam consideradas monomodo (DA SILVA, 2013). Para obtenção do modo fundamental da fibra, a



formulação apresentada resumidamente na seção anterior foi utilizada. Para calcular os autovalores presentes na estrutura da PQCF com simetria 12 vezes, considerando  $d = 0,75$  e  $d/\Lambda = 0,31$ , o domínio computacional foi dividido em aproximadamente 30.000 elementos triangulares considerando o raio externo da PQCF de  $21 \mu\text{m}$ . Para os cálculos considerando  $d/\Lambda = 0,21$  e  $d/\Lambda = 0,41$  a PQCF foi dividida em 25.000 e 35.000 elementos lineares, respectivamente.

### 3.5 CONCLUSÃO

Neste capítulo, foi apresentada a proposta desse trabalho que está baseada na aplicação do método da propagação vetorial de feixes (VBPM) em um estudo sobre as SIHF aplicadas no desenvolvimento de um acoplador óptico. Em adição, o VBPM, também foi aplicado com sucesso na análise de um novo modelo de fibra micro estruturada baseada em quase cristais fotônicos. O objetivo principal deste capítulo foi mostrar a versatilidade do método VBPM na análise de diferentes modelos de estruturas fotônicas

## Capítulo 4 - Resultados e Discussões

### 4.1 ANÁLISE DE ACOPLADORES BASEADOS EM SIHF

O foco principal desse trabalho, é aplicar o VBPM, proposto por (DA SILVA, 2004a), na análise de acopladores fotônicos baseados em SIHF (do inglês *Istep Index Holey Fiber*) e na análise de Fibras baseadas em quase cristais fotônicos. Neste Capítulo, apresentaremos os resultados obtidos na análise das duas aplicações descritas acima. Em todas as simulações realizadas, as estruturas são compostas por Sílica dopada com Germânio e os resultados obtidos são comparados aos resultados obtidos utilizando sílica pura sob as mesmas condições de operação dos dispositivos. Os resultados, aqui obtidos, apresentam uma boa concordância com os resultados provenientes do uso de técnicas de análise já conhecidas e consagradas, tais como o método BPM escalar e o método VBPM que emprega as três componentes do campo magnético  $\mathbf{H}$  (DA SILVA, 2003). Varias outras comparações foram feitas com os métodos apresentados e publicados em congressos e revistas especializadas na área. Para todas as simulações e análises da propagação apresentadas neste capítulo, foram feitas, também, a análise modal e os resultados foram comparados e apresentaram boas concordâncias.

Para obtenção do novo modelo de fibra, aqui intitulada SIHF, com excelentes características de dispersão, foram consideradas várias configurações de fibra e o melhor resultado foi obtido, considerando uma fibra com índice de refração do núcleo perfurado com os seguintes parâmetros:  $\eta_1 = 1.05214$ ,  $\eta_2 = 1.0$ ,  $r_1 = 0.2 \mu\text{m}$  e  $r_2 = 1.8 \mu\text{m}$ . A partir destes parâmetros, passamos a analisar as características de acoplamento para o melhor caso em que a dispersão obtida foi considerada ultra-plana variando entre -2 e +2 ps / (km.nm) para uma faixa de comprimentos entre 1.2  $\mu\text{m}$  e 2.2  $\mu\text{m}$ , como mostra a Figura 4.1 (linha com símbolos quadrados).

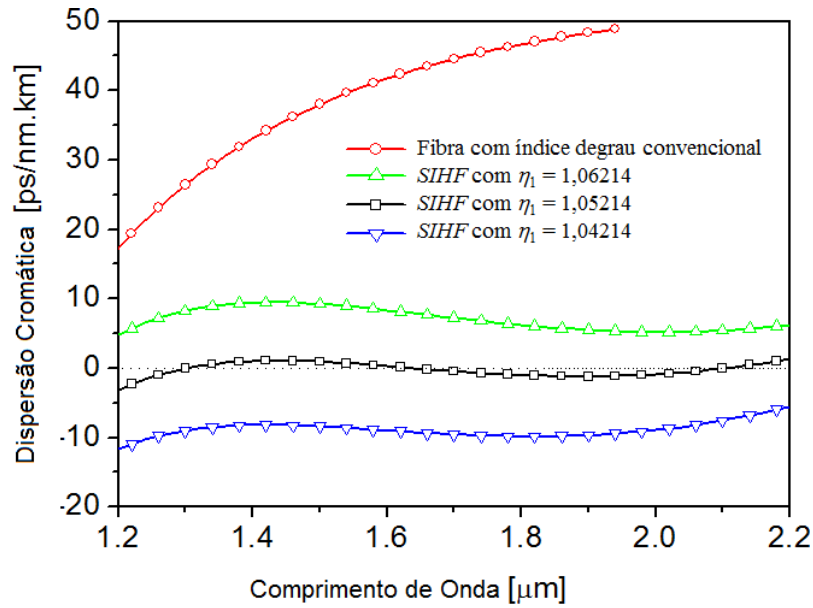


Figura 4.1: Dispersão Cromática em função do índice do comprimento de onda.

Em seguida, serão analisados os efeitos da variação do comprimento de onda na máxima transferência de energia entre dois núcleos de uma fibra considerando uma SIHF, mostrados na Figura 3.2a. A transferência pode ser controlada variando a distância entre os núcleos ou variando o comprimento de onda. Para essa análise serão considerados dois valores para a distância entre os núcleos,  $\ell = 0,5 \mu\text{m}$  e  $\ell = 1,0 \mu\text{m}$ , e os resultados serão obtidos considerando-se os seguintes valores para o comprimento de onda,  $\lambda = 1,2 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$  e  $\lambda = 2,2 \mu\text{m}$ .

Em todas as simulações, o tempo total necessário pela CPU para obter cada curva o resultado foi de aproximadamente 5,2 minutos rodando em um Computador Pentium com Núcleo "i7 e 6 GB de RAM. Nas simulações considerando a estrutura com dois núcleos, o sinal foi lançado no núcleo da esquerda com um feixe correspondente ao modo  $E_{11}^x$ , cujo o índice efetivo ( $n_{\text{eff}}$ ) foi calculado através da relação  $\beta/K_0$ , obtidos separadamente para cada uma das fibras através da análise modal (DA SILVA, 2003b). O comprimento de acoplamento  $L$ , obtido utilizando o VBPM para as duas aplicações com SIHF aplicada para constituir os acopladores está de acordo com o valor obtido através da relação  $L_B = \pi / (\beta_{\text{eff}1} - \beta_{\text{eff}2})$  (DA SILVA, 2003b), onde  $L_B$  é o comprimento de batimento dos modos, e  $\beta_{\text{eff}1}$  e  $\beta_{\text{eff}2}$  correspondem a constante de propagação dos modos super simétricos e assimétricos de ordem inferior, respectivamente. A comparação com os resultados obtidos através da análise modal, confirmam a precisão do método

aplicado, uma vez que a técnica de análise modal é reconhecida precisa para este tipo de aplicação.

Para se obter uma dispersão ultra-plana, a SIHF foi otimizada usando uma técnica evolutiva baseada em algoritmos genéticos (GA), em conjunto com o método dos elementos finitos (KUNIMASSA, 2003). Os resultados mostrados na Figura 4.1 foram obtidos utilizando uma janela computacional circular com raio de  $28,8 \mu\text{m}$  divididos em aproximadamente de 10.000 elementos lineares (cálculos preliminares mostraram que o uso de malhas mais refinadas não melhoram a precisão dos resultados numéricos) e passo de propagação passo  $\Delta z = 0,1 \mu\text{m}$ . A Figura 4.2 mostra a potência normalizada ao longo da direção de propagação,  $z$ , para o acoplador com dois núcleos, onde a linha simples representa a potência no núcleo 1 e a linha com símbolos representa a potência no núcleo 2, considerando  $\ell = 0,5 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_1 = 1,55 \mu\text{m}$  e  $\lambda_2 = 1,2 \mu\text{m}$  formando o acoplador 1.

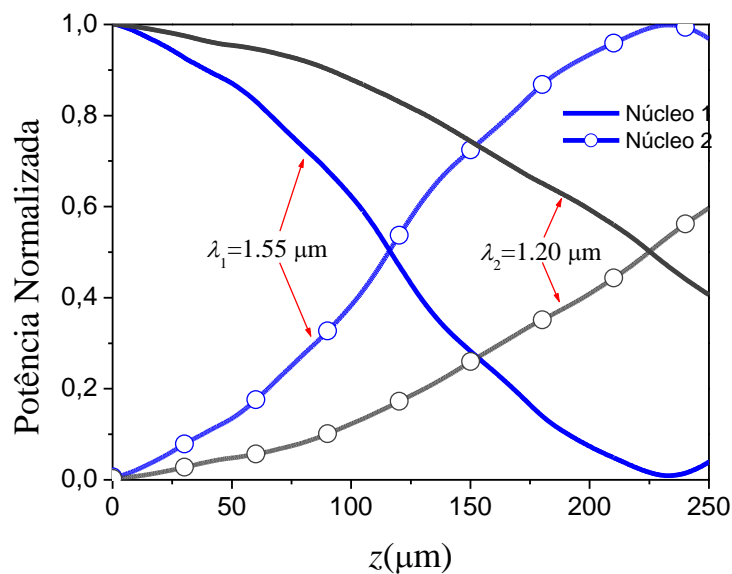


Figura 4.2: Potência normalizada ao longo da direção de propagação,  $z$ , para o acoplador com dois núcleos com  $\ell = 0,5 \mu\text{m}$ .

A Figura 4.3 mostra a potência normalizada ao longo da direção de propagação para o acoplador com dois núcleos, onde a linha simples representa a variação de energia no núcleo 1 e a linha com símbolos representa a variação da energia no núcleo 2, considerando  $\ell = 1,0 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_1 = 1,55 \mu\text{m}$  e  $\lambda_2 = 1,2 \mu\text{m}$ , acoplador 2.

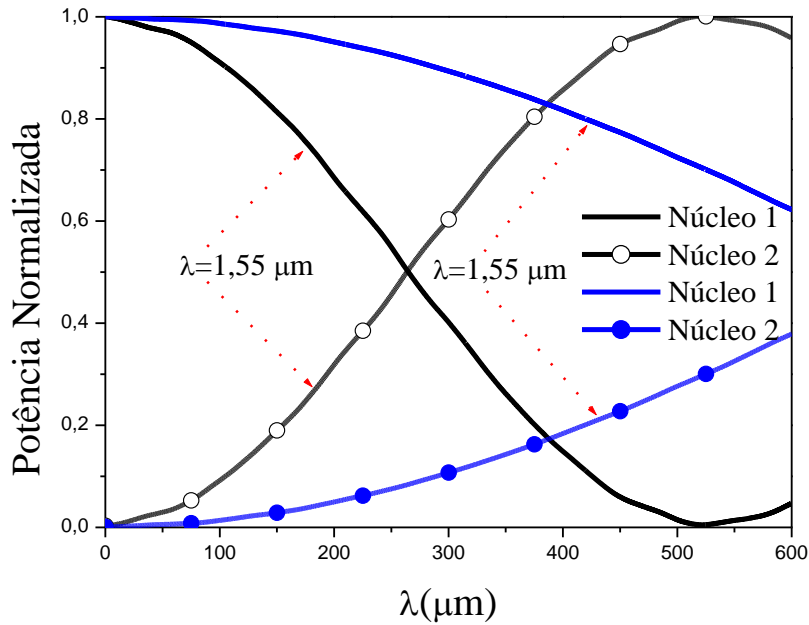


Figura 4.3: Potência normalizada ao longo da direção de propagação,  $z$ , para o acoplador com dois núcleos com  $\ell = 1,0 \mu\text{m}$ .

A Figura 4.4 mostra a transferência de energia entre os núcleos da SIHF para o acoplador com dois núcleos considerando  $\ell = 1,0 \mu\text{m}$  e  $\lambda = 2,2 \mu\text{m}$ , aqui chamado de acoplado 3. Nesse caso observa-se uma forte dependência dessa transferência de energia em função da variação do comprimento de onda.

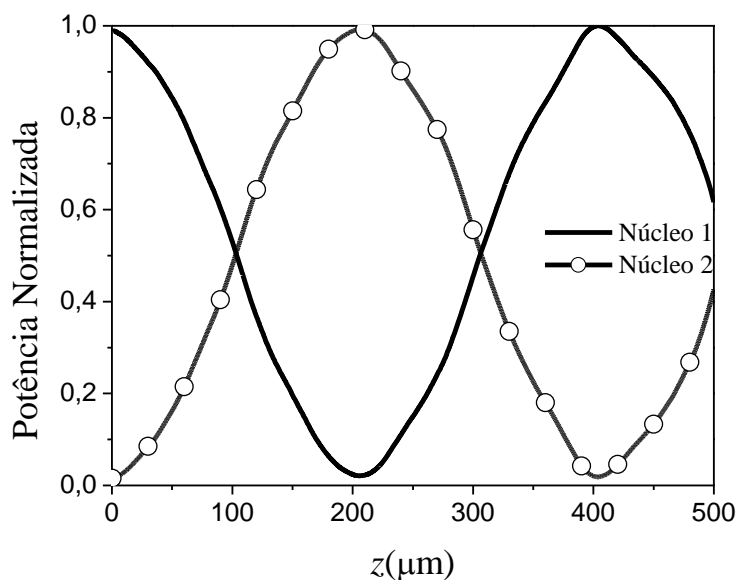


Figura 4.4: Transferência de energia entre os núcleos da SIHF para o acoplador com dois núcleos considerando  $\ell = 1,0 \mu\text{m}$  e  $\lambda = 2,2 \mu\text{m}$ .

Na aplicação a seguir, considera-se a estrutura representada na Figura 3.2b, aqui, o VBPM foi aplicado para calcular a distância de acoplamento para a SIHF com três núcleos, com um furo de ar no centro de cada núcleo (acoplador 4). Neste caso, a estrutura foi excitada com um feixe lançado no núcleo central (núcleo 1) e a máxima transferência de potência para uma distância em torno de 500  $\mu\text{m}$ . É importante destacar, que as fibras ópticas com vários núcleos desempenham um papel importante para adivisão de potência em redes de fibras ópticas (KUNIMASSA, 2005). Em relação a estes modelos de dispositivo, uma única potência pode ser dividida entre vários núcleos na estrutura e transmitida para diferentes locais para fins adicionais. Neste caso, um contato mútuo entre os núcleos é estabelecido através de um processo de fusão. Este processo de fusão resulta numa região cônica do material óptico fundido, em que a transferência de energia entre as fibras ocorre devido à sua proximidade.

Os resultados para o acoplador 4 é mostrado na Figura 4.4 e representa a potência normalizada ao longo da direção de propagação para o acoplador constituído a partir de SIHF com três núcleos. A curva com os círculos vazios corresponde à variação de potência do núcleo central ou núcleo 1, a curva com os círculos cheios corresponde à variação de energia no núcleo horizontal esquerdo ou núcleo 2 e a curva com quadrados semi-cheios corresponde à potência acoplada no horizontal direito, ou núcleo 3, considerando  $\ell = 1,0 \mu\text{m}$  e comprimento de onda  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ , na direção de propagação. Nesta simulação, o raio da janela computacional circular utilizado, foi de 28,8  $\mu\text{m}$  divididos em cerca de 15.000 elementos lineares e o passo de propagação utilizado foi  $\Delta z = 0,1 \mu\text{m}$ .

Pode-se notar a partir dos resultados numéricos que a potência nos núcleos 2 e 3 aumentar gradualmente, enquanto que toda potência lançada no núcleo central é transferida para os núcleos adjacentes na distância de propagação em torno de 380  $\mu\text{m}$ .

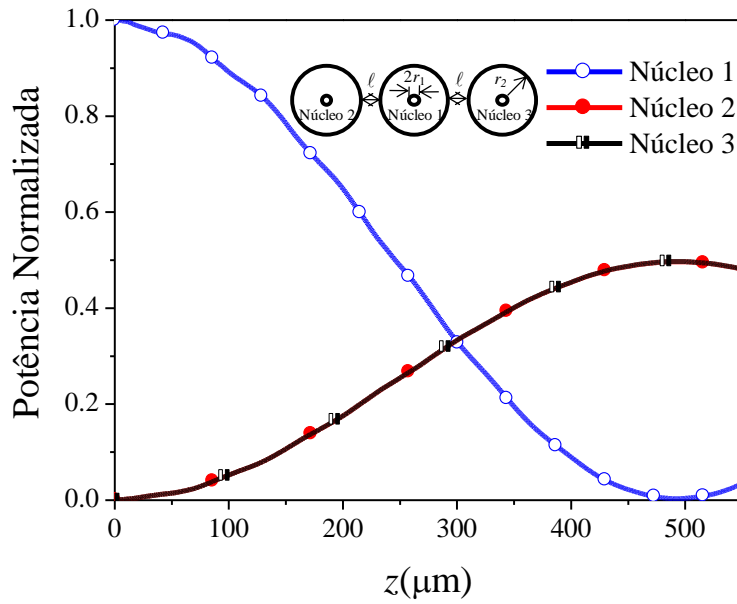


Figura 4.5: Potência normalizada ao longo da direção de propagação para o acoplador constituído a partir de uma SIHF com três núcleos considerando  $\ell = 0,5 \mu\text{m}$ .

Em seguida, no acoplador 5 (Figura. 4.5) mostra-se os resultados para a potência normalizada ao longo da direção para o acoplador constituído a partir de uma SIHF com três núcleos, considerando  $\ell = 1,0 \mu\text{m}$  e comprimento de onda  $\lambda = 1,20 \mu\text{m}$ . Aqui, a curva com círculos vazios corresponde à variação da potência do núcleo central ou núcleo 1, a curva com os círculos cheios corresponde à potência acoplada no núcleo horizontal esquerda ou núcleo 2 e a curva azul com quadrados semi cheios corresponde a potência acoplada no núcleo horizontal direita ou núcleo 3. Os parâmetros de malha utilizados nesta simulação foram os mesmos utilizados para a obtenção do acoplador 4, neste caso, as potências nos núcleos 2 e 3 também aumentam gradualmente, enquanto toda a energia lançada no núcleo central é transferida para os núcleos adjacentes, para uma distância de propagação de aproximadamente  $1000 \mu\text{m}$ .

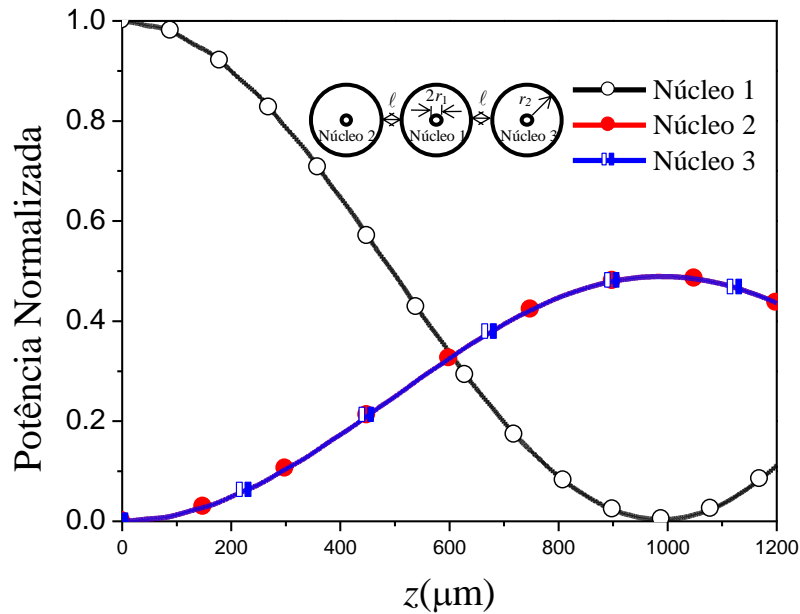


Figura 4.6: Potência normalizada ao longo da direção de propagação para o acoplador constituído a partir de uma SIHF com três núcleos considerando  $\ell = 1,0 \mu\text{m}$ .

Resultados preliminares, baseado em análise de sensibilidade na distância entre os núcleos ( $\ell$ ) e comprimento de onda da SIHF, demonstram que uma pequena variação nesses parâmetros, mantendo os demais constantes, podem causar variações significativas na distância de acoplamento. Em adição, as perdas presentes nestes tipos de acopladores, são desprezíveis, devido à propagação de sinal a ocorrer por reflexão total interna. Estes tipos de dispositivos ópticos são bastante sensíveis a mudanças no comprimento de onda, de modo que eles são amplamente utilizados como multiplexadores por divisão de comprimento de onda, do inglês, *wavelength Division Multiplexing* (WDM), para aplicação em sistemas de telecomunicações, que combinam vários canais de entrada, com diferentes comprimentos de onda, ou para separar canais.

## 4.2 DISPERSÃO CROMÁTICA EM UMA FIBRA ÓPTICA BASEADA EM QUASE CRISTAL FOTÔNICO

Finalmente, a próxima aplicação analisa a dispersão cromática em uma fibra óptica baseada em quase cristais fotônicos (PQCF), que tem unidade elementar mostrada na Figura. 3.4a e a estrutura com simetria de doze vezes mostrada na Figura 3.4b, onde os círculos vermelhos representam buracos de ar. A saber, os buracos de ar provocam a diminuição do índice de refração médio da região do revestimento da fibra



e confina a luz no núcleo de sílica dopada com germânio. Desta forma, a propagação da luz na PQCF, ocorre devido à reflexão interna total, que descreve o guiamento da luz no núcleo central sólido (SOAN KIM, 2009), essa característica para o tipo de fibra proposto, torna as perdas desprezíveis em relação ao alcance do sinal propagado. Aqui, as equações de Sellmeier para sílica dopada com germânio foram utilizadas para obtenção do índice refração em função do comprimento de onda.

Resultados preliminares mostraram que o uso de malhas com um número de elementos muito maior do que aqueles experimentados nesta análise, não melhora a precisão dos resultados numéricos. A figura 4.6 mostra a dispersão cromática para PQCF com simetria doze vezes, em função do comprimento de onda para uma faixa que vai de 1,25 a 2,0  $\mu\text{m}$ . A figura 3.7 mostra a dispersão cromática para o modo fundamental da PQCF considerando a variação do comprimento de onda dentro do espectro de frequências óptico, ou seja, o comprimento de onda variando de 1,4 a 1,6  $\mu\text{m}$ . Pode-se notar que pequenas variações no diâmetro dos furos de ar, mantendo a relação  $d/\Lambda$  fixa, representam importantes variações no valor de dispersão cromática. Para PQCF com  $d = 0,75$  e  $d/\Lambda = 0,31$  a dispersão varia entre 22,1 e 23,01  $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ , para uma faixa de comprimentos de 1,4  $\mu\text{m}$  a 1,6  $\mu\text{m}$ . Para essa faixa de comprimentos de onda, a dispersão cromática é ultra-plana, o que sugere sua aplicação como dispositivo de compensação de dispersão cromática.

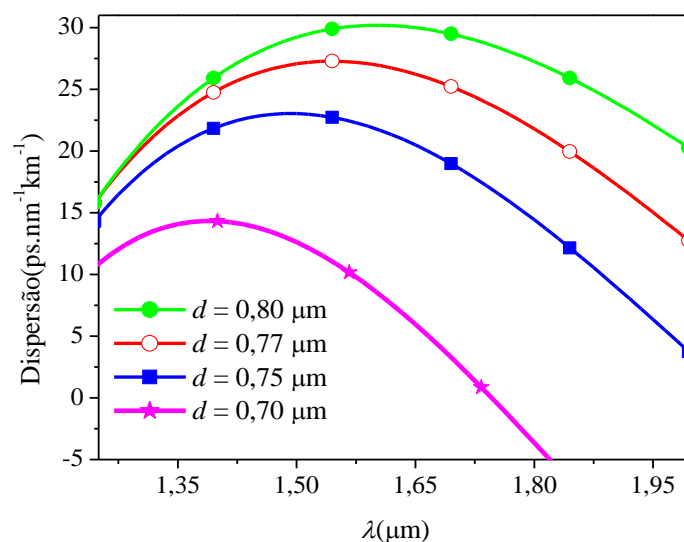


Figura 4.7: Dispersão cromática para o modo fundamental da estrutura com simetria 12 vezes considerando  $d/\Lambda = 0,31$  para um faixa de comprimentos de onda de 1,25 a 2,0  $\mu\text{m}$ .

A Figura. 4.8 mostra a comparação entre as dispersões cromáticas para o modo fundamental da PQCF com  $d = 0,75$  e  $d/\Lambda = 0,31$  considerando a estrutura com simetria de 6 e 12 vezes. Em ambos os casos a dispersão cromática pode ser considerada plana.

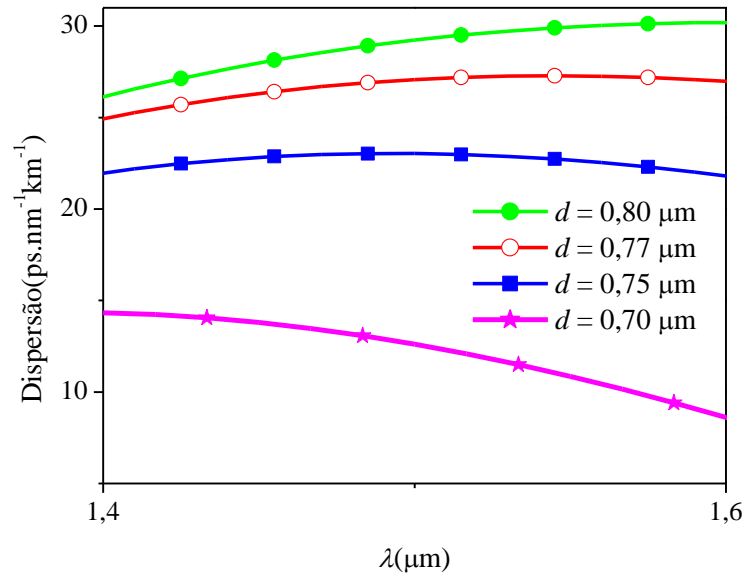


Figura 4.8: Dispersão cromática para o modo fundamental da estrutura com simetria 12 vezes considerando  $d/\Lambda = 0,31$  para uma faixa de comprimentos de onda de 1,4 a 1,6  $\mu\text{m}$ .

Em adição, quando consideramos apenas a faixa de comprimentos de onda do espectro óptico, ou seja,  $\lambda$  variando de 1,4 a 1,6  $\mu\text{m}$ , a dispersão cromática da PQCF, para as duas configurações, pode ser considerada ultra plana com valores de dispersão dentro do espectro óptico correspondente as bandas *E*, *S*, *C* e *L*. A estrutura com simetria 12 vezes apresenta dispersão um pouco menor em relação à estrutura com de simetria 6 vezes (DA SILVA, 2013). Considerando a estrutura com repetição 12 vezes, a inclinação da dispersão cromática foi de  $0,0091$  [ps. km<sup>-1</sup>. nm<sup>-2</sup>] para a banda *E* (1360-1460 nm) e  $0,00015$  ps. km<sup>-1</sup>. nm<sup>-2</sup> para banda *L* (1565-1625 nm), com valores de  $22,555 \pm 0,455$  [ps.km<sup>-1</sup>.nm<sup>-1</sup>]. Para efeito de projeto, em (DA SILVA, 2011), os autores consideram como ultra plana uma dispersão com variação de aproximadamente  $17$  [ps.km<sup>-1</sup>.nm<sup>-1</sup>], para uma largura de banda de  $0,35 \mu\text{m}$ . Nesse trabalho, a variação de dispersão ( $\Delta D$ ) foi de aproximadamente  $0,91$  [ps.km<sup>-1</sup>.nm<sup>-1</sup>], para uma largura de banda  $0,2 \mu\text{m}$ . A Figura 4.9 mostra a comparação entre as dispersões cromáticas para as configurações com 6 e 12 repetições.

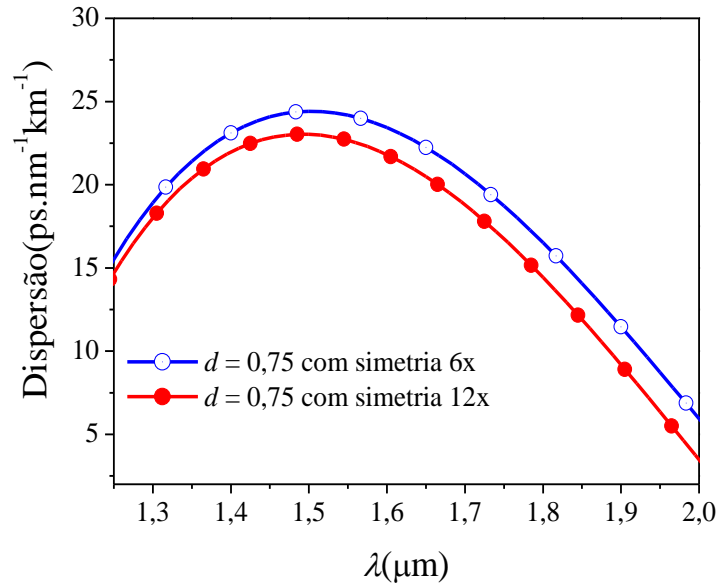


Figura 4.9: Comparação entre as dispersões cromáticas para o modo fundamental da PQCF com simetrias 12 e 6 vezes, considerando  $d/\Lambda = 0,31$  e  $d = 0,75 \mu\text{m}$ .

A fibra proposta neste trabalho apresenta características de uma fibra monomodal, como pode ser visto na figura 4.10, O modo fundamental corresponde ao modo  $H_X^{11}$  e para reforçar esta tendência. Nessa pode-se observar a dispersão cromática obtida para os dois primeiros modos propagantes, o modo fundamental e o modo de segunda ordem, considerando o índice de refração efetivo ( $n_{eff}$ ) calculado através da relação  $\beta/k_0$ , pode-se ver que os modos não são degenerados. Entretanto, resultados preliminares mostram que a presença dos buracos de ar pode influenciar na frequência de corte dos modos propagantes em relação à fibra com núcleo sólido. Ou seja, pequenas variações no diâmetro dos buracos de ar e/ou na relação  $d/\Lambda$ , poderá influenciar na configuração das características modais da PQCF.

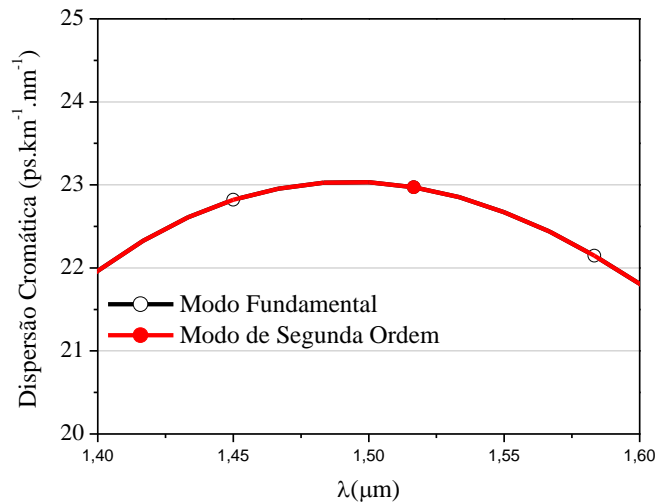


Figura 4.10: Dispersão cromática para os dois primeiros modos da PQCF com simetria 12 vezes considerando  $d/\Lambda = 0,31$  e  $d = 0,75 \mu\text{m}$

A figura 4.11 mostra a variação da área efetiva do modo fundamental em função do comprimento de onda para as PQCF com simetrias 6 e 12 vezes. A área efetiva ( $A_{eff}$ ) é uma medida quantitativa da área efetivamente coberta pelo modo da fibra em relação às dimensões transversais. A área efetiva foi calculada através da seguinte expressão (KUNIMASSA, 2005):

$$A_{eff} = \frac{\left( \iint |E|^2 dx dy \right)^2}{\iint |E|^4 dx dy} \quad (6)$$

Onde  $E$  representa o campo elétrico.

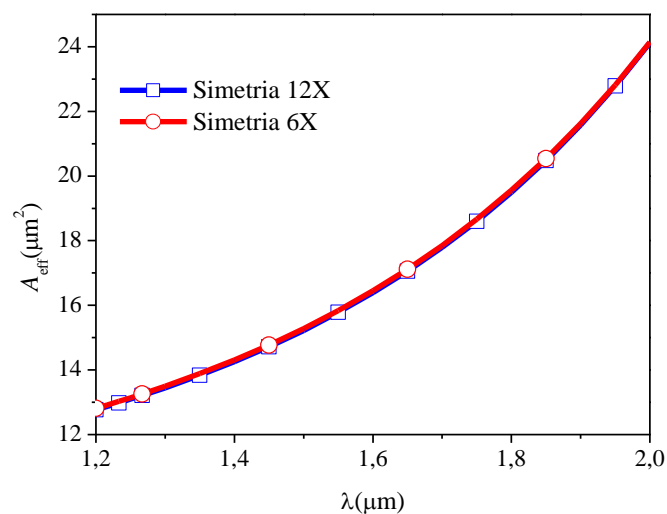


Figura 4.11: Área efetiva do modo fundamental da PQCF com simetria 12 vezes e simetria 6 vezes considerando  $d = 0,75$  e  $d/\Lambda = 0,31$ .

Como podemos ver na figura 4.11, a área efetiva para as duas configurações das fibras em análise são equivalentes, isso ocorre devido às regiões de confinamento do campo elétrico ser iguais para as duas configurações. A figura 4.12 mostra a dispersão cromática para o modo fundamental da estrutura com simetria 12 vezes considerando variações de  $d/\Lambda$  em  $\pm 0,10$  para uma faixa de comprimentos de onda variando de 1,25  $\mu\text{m}$  a 1,8  $\mu\text{m}$ .

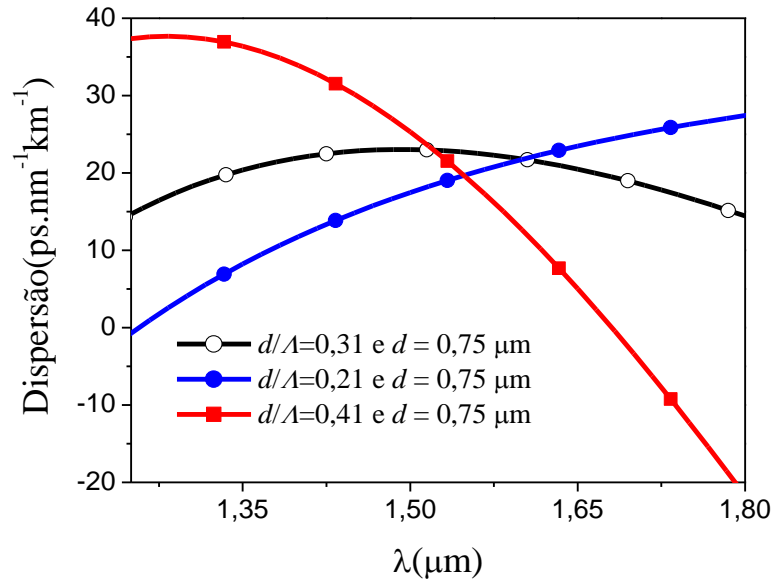


Figura 4.12: Dispersão cromática para o modo fundamental da estrutura com simetria 12X considerando variações de  $d/\Lambda$  para uma faixa de comprimentos de onda variando de 1,25  $\mu\text{m}$  a 1,8  $\mu\text{m}$ .

Observa-se que pequenas variações na relação  $d/\Lambda$  implica em grandes variações na curva de dispersão e conseqüente deslocamento do ponto de máxima dispersão, produzindo valores não planos da dispersão dentro do espectro óptico correspondente as bandas  $E$ ,  $S$ ,  $C$  e  $L$ . Em todas as simulações a espessura da PML cilíndrica foi de 1  $\mu\text{m}$ , ou seja,  $d_{PML} = 1,0 \mu\text{m}$ , com esta espessura, a janela computacional usada ficou livre de qualquer possibilidade de reflexões indesejáveis nos limites estabelecidos. É importante ressaltar, que para obter uma faixa maior de comprimentos de ondas com dispersão cromática ultra-plana, nós estamos trabalhando na otimização da estrutura mostrada na figura 3.4b, usando técnicas evolutivas, tais como Algoritmos Genéticos. Uma possível aplicação desse modelo de fibra como acoplador direcional está em análise. A figura 4.13 mostra a distribuição do campo modal para componente  $h_x$  da PQCF. Este resultado mostra, através da distribuição de campo, a energia armazenada no núcleo

central da estrutura, que tem como característica, confinar o modo fundamental na região com ausência de furos de ar, também conhecida como região com defeito ou região com maior quantidade de núcleo sólido.

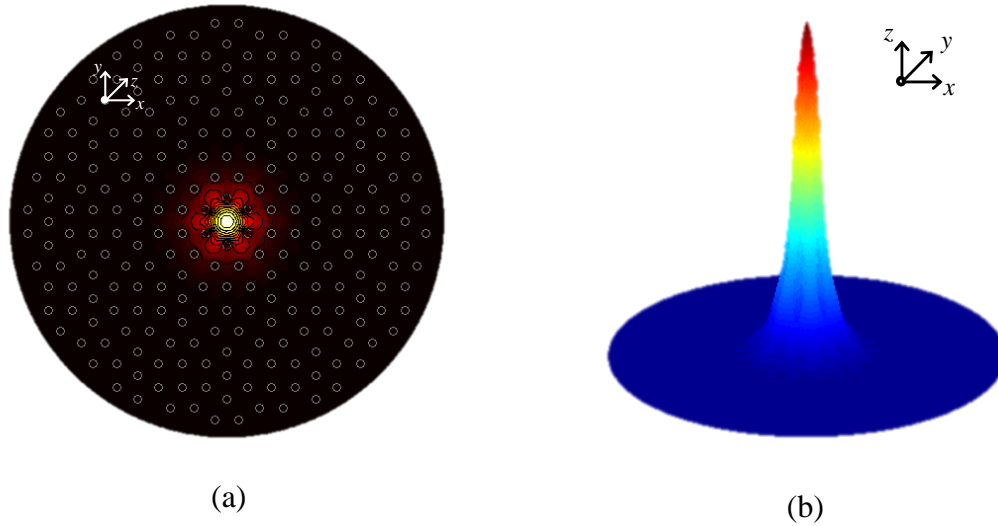


Figura 4.13: Distribuição de campo para o modo fundamental com  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$  (a) Curva de níveis e (b) Superfície.

### 4.3 CONCLUSÃO

Neste capítulo, o VBPM em conjunto com camadas perfeitamente casadas do tipo cilíndricas e como o GA foi aplicado com sucesso para a análise de acopladores constituídos a partir de dois e três núcleos imersos em uma SIHF. Em seguida foi analisada a dispersão, também usando o VBPM, em novo modelo de fibra óptica, baseada em quase cristais fotônicos.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, o VBPM em conjunto com as CPML e GA foram aplicadas com sucesso para a análise do acoplador constituído a partir de dois e três núcleos imersos em uma SIHF e na análise de um novo modelo de fibra óptica baseada em quase cristais fotônicos. Nas aplicações, a formulação permitiu a inserção de condições de contorno do tipo CPML, diretamente nos cálculos. As equações de Sellmeier foram aplicadas para determinar os índices de refração da sílica pura e da sílica dopada com germânio.

Na primeira aplicação, a estruturas analisadas apresentam uma geometria simples quando comparado com algumas estruturas baseadas em fibras de cristal fotônica usados como acopladores. Os parâmetros  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $r_1$  e  $r_2$  foram otimizados através de GA. Os resultados obtidos para o acoplador de dois núcleos mostram que a potência lançada no núcleo 1 é inteiramente transferida para o núcleo adjacente 2. Quando se considera o acoplador constituído por três núcleos, a potência lançada no núcleo central foi igualmente dividida entre dois vizinhos e núcleos equidistantes em relação ao núcleo central, em razão de acoplamento em torno de 50%, como esperado.

Na segunda aplicação, VBPM em conjunto com a análise modal e camadas perfeitamente casadas do tipo cilíndricas, foi aplicado com sucesso para análise de uma fibra óptica do tipo quase cristal fotônico. A estrutura analisada exibe uma dispersão cromática ultra plana para uma faixa de comprimento de ondas que vai de 1,4 a 1,6  $\mu\text{m}$  cobrindo as bandas E, S, C e L, com dispersão cromática, para sílica dopada com germânio, variando entre 22,1 e 23,01 ps/(nm-1 km-1). Devido à pequena variação relativa, de aproximadamente 4 %, o modelode estrutura analisado, poderá ser aplicado para compensação de dispersão dentro da faixa onde na qual a mesma é ultra plana.

A principal contribuição deste trabalho foi o desenvolvimento de um novo e simples acoplador óptico, baseado em uma SIHF e a obtenção de um novo modelo de fibra óptica baseada em quase cristais fotônicos com simetria 12 vezes considerando um núcleo sílica dopado com germânio. Nesse caso, resultados preliminares mostram que o percentual de dopagem pode influenciar na variação da dispersão cromática em função do comprimento de onda. Outros dispositivos podem ser analisados e possivelmente novos resultados serão apresentados da defesa da dissertação.

## 6. Trabalhos Futuros

Adaptar a formulação para a análise de estruturas com perfis não-lineares, incorporando-se novas malhas adaptativas e análise de novos modelos de estruturas fotônicas.

## Referências Bibliográficas

AGRAWAL, G. P., **Fiber-Optics Communication System**, 3. Ed. New York, University of Rochester, 2002. 530 f., ISBNs: 0-471-21571-6 (Hardback); 0-471-22114-7 (Electronic).

BERENGER, J. P., *A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves*, 1994, pp. 185-200, Journal of Computational. Physics, vol. 114, Arcueil, France – Outubro 1994.

BEZERRA, D. S., **Otimização e Análise de Dispositivos Fotônicos Baseados em Fibras Ópticas Utilizando Algoritmos Genéticos**, 2009. 51 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) – Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN) e Universidade Federal do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, 2009.

BUCK, J., **Fundamentals of Optical Fibers**. Hoboken, NJ:Wiley-Interscience, 1995.

CHAN C. T., HO K. M. and SOUKOULIS C. M., *Existence of a Photonic Gap in Periodic Dielectric Structures*, 1990, 4f, Physical Review Letters, 1990.

CHESINI, G., **Dispositivos Ópticos Baseados em Fibras de Cristal Fotônico com Eletrodos Integrados**, 2009. 87 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade de Campinas, São Paulo, 2009.

COLLIN, R. E - *Foundations for Microwave Engineering*, Segunda Edição, 2000.944 f, *The IEEE Press Series on Electromagnetic Wave Theory*, 2000.63.



CORREA, D.S., **Absorção de multi-fótons em polímeros e resinas poliméricas:espectrologia não linear e micro-fabricação**. 2009, 177f. Universidade de São Paulo, 2009.

DA SILVA, J. P., **Simulação por Elementos Finitos da Propagação de Feixes Óptico sem Estruturas Fotônicas**, 2003. 86 f., Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica) –Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2003a.

DA SILVA, J. P., BELLAGUARDA, M. F. **Análise do Acoplamento entre os núcleos de uma Fibra de cristal fotônico dopada com germânio**, 2011. 4 f., Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – Curitiba, Paraná, 2011.a

DA SILVA, J. P., BEZERRA, D. S e HERNÁNDEZ-FIGUEROA H. E., “**Step index holey fiber design bygenetica lgorithm for chromatic dispersion compensation**”, 2011,Microwave and Optical Techn. Letters, 2011.c

DA SILVA, J. P., D. S. BEZERRA, V. F. RODRIGUES-ESQUERRE, I. E. DA FONSECA AND H. E. HERNANDEZ-FIGUEROA, “**Ge-doped Defect-core Microstrutured Fiber Design by Genetic Algorithm for Residual Dispersion Compensation**”, IEEE Photonics Technology Letters, V. 22, pp. 1337-1339, 2010.

DA SILVA, J. P., H. E. HERNÁNDEZ-FIGUEROA AND A. M. F. FRASSON, “**Vectorial finite-element BPM Analysis for Transverse Anisotropic Media**”, Journal of Lightwave Technology, V. 21, pp. 567-576, 2003b.

DA SILVA, J. P., “**Ge-Doped Microstrutured Fiber Design by Genetic Algorithm for Directional Coupling**”, Microwave and Optical Technology Letters, V. 55, pp. 1710-1712, 2013a.

DA SILVA, J. P, E. R. M. DANTAS, “**Modal Analysis of a Photonic Quasi crystal Fiber Doped with Germanium**” Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), 2013 SBMO/IEEE MTT-S International, IEEE, 2013b.

FEYNMAN, R. P., *The Feynman Lectures on Physics*, vol. 2, 1964. 546 f, California Institute of Technology, *United States of America*.

JESUS, J. T., “**Acopladores Direcionais de Fibras Óticas Monomodo**”, 1985. 92 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade de Campinas, São Paulo, 1985.

KERSEY A.D. “**A review of recent developments in fiber optic sensor technology**”, *Optical Fiber Technology*, 1996, 27 f. V. 2, 1996.

KOSHIBA, M. *et al.*, “**Coupling characteristics of multicore photonic crystal fiber-based 1x4 Power Splitters**”, 2009, 7 f. 200964.

KUMAR, R. K., VARSHNEY, and SINHA R. K., “**Scalar modes and coupling characteristics of eight-port waveguide couplers**”, 1989, vol. 7, pp. 293–296, 1989. LEVY, R. *Directional Couplers*, 1966. Ed., *Advances in Microwaves*, Vol. 1, Academic Press, New York, 1966.

KUNIMASSA SAITOH, Y. SATO and M. KOSHIBA, “**Coupling Characteristics of Dual Core Photonic Crystal Fibers Couplers**”, *Optics Express*, V. 11, pp. 3188-3195, 2003.

KUNIMASSA SAITOH, N. FLOROUS and M. KOSHIBA, “**Ultra-Flattened Chromatic Dispersion Controllability Using a Defected-Core Crystal Fiber with Low Confinement Losses**”, *Optics Express*, V. 13, pp. 8365-8371, 2005.

LI YU-HE, FAN WAN-DE, SHENG QIU-QIN, “**A novel Photonic Quasi-crystal Fiber with Broadband Large Negative Dispersion**”, *Chine Physics Letters*, V. 27, pp. 114211-1-4, 2010.

MALDONADO, E. P., MATOS, D. C., **Aspectos Fundamentais da Tecnologia de Fibras Óticas**, 2003, 7 f., Centro Universitário São Camilo, 2003.

MATEUS, C. F. R. *et. al*– **Construção de Acopladores Direcionais a Fibra Óptica Birrefringente**, 1999, 6 f. São José dos Campos, 1999.

MORTIMORE, D. B., “**Wavelength-flattened fused couplers**”, 1985, 2f., vol. 21, 1985.

MORTIMORE, D. B. “**Theory and fabrication of 4x4 single-mode fused optical fiberCouplers**”, 1990, 4f., vol. 29, 1990.

OLIVEIRA, K. M. B., “**Fibra de Cristal Fotônico: Fundamentação e Aplicação**”, 2002. 87f, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.

OLIVEIRA, R. E. P., “**Caracterização da Sensibilidade de Fibras de Cristal Fotônico à Pressão e Temperatura para Aplicação em Sensoriamento**”, 2010, 93 f, Dissertação.

(Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, São Paulo, 2010.

QUIÑÓNEZ, F. A., “**Cristais Fotônicos 2D: Projeto e Fabricação**”, 2006. 67 f, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

SANTOS, A. B., “**Geração de Supercontínuo em Fibra Óptica de Cristal Fotônico com Núcleo de Água**”, 2007, 113f, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2007.

SANTOS, E. M., “**Processos relacionados à inserção de fluidos para sensoriamento com Fibras de Cristal Fotônico**”, 2007. 98 f, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

SHAIENDRA K. V., SAITOH K., RAVINDRA K. S. and KOSHIBA M., “**Coupling characteristics of multicore photonic crystal fiber-based 1x4 power splitters**”, 2009, 7p, v.27, , 2009.

SMIDERLE, C., BOFF, D., “**Fibras Ópticas**”, 2003. 26 f, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2003.

SOAN KIM AND CHUL-SIK KEE, “**Dispersion Properties of Dual-Core Photonic Quasi crystal Fibers**”, Optics Express, V. 15, pp. 15885-15890, 2009.

SPADOTI, D.H, BORGES H.V and ROMERO, M.A., “**Novel microstructured optical fiber design for broadband dispersion compensation**”. 2007, 5f., Microwave and Optoelectronics Conference, 2007. IMOC 2007. SBMO/IEEE MTT-S International 2007.

SOAN KIM and CHUL-SIK KEE, “**Dispersion Properties of Dual-Core Photonic Quasi-crystal Fibers**”, Optics Express, V. 15, pp. 15885-15890, 2009.

VASCONCELOS, Y. “**Filamentos Versáteis**”, Fapesp, 2008. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/art=3523&bd=1&pg=1&lg=>>. Acesso em: 20 Set.

XIN. CHEN, M. J. LI, J. KOH, A. Artuso and D. A. Nolan, “**Effects of Bending on the Performance of Hole-Assisted Single Polarization Fibers**”, Optics Express, V. 15, pp. 10629-10636, 2007.