



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
E DE COMPUTAÇÃO



Marcos Túlio Antunes Bezerra Segundo

Aplicação de Modelos de Sequências Quase Periódicas em Guias de Onda Ópticos

Orientador: Prof. Dr. José Patrocínio da Silva

Natal, RN, 22 de dezembro de 2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
E DE COMPUTAÇÃO



Aplicação de Modelos de Sequências Quase Periódicas em Guias de Onda Ópticos

Marcos Túlio Antunes Bezerra Segundo

Orientador: Prof. Dr. José Patrocínio da Silva

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Telecomunicações) como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Natal, RN, 22 de dezembro de 2023

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Bezerra Segundo, Marcos Túlio Antunes.

Aplicação de modelos de sequências quase periódicas em guias de onda ópticos / Marcos Túlio Antunes Bezerra Segundo. - 2024. 93 f.: il.

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação. Natal, RN, 2024.

Orientação: Prof. Dr. José Patrocínio da Silva.

1. Guias de Onda Ópticos - Tese. 2. Fibra de Grade de Bragg - Tese. 3. Quase-Cristais - Tese. 4. COMSOL - Tese. I. Silva, José Patrocínio da. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.38(043.2)

Marcos Túlio Antunes Bezerra Segundo

Aplicação de Modelos de Sequências Quase Periódicas em Guias de Onda Ópticos

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica e Computação (área de concentração: Telecomunicações) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Trabalho aprovado. Natal, RN, 22 de dezembro de 2023:

Prof. Dr. José Patrocínio da Silva
Presidente

Prof. Dr. Vicente Angelo de Souza Junior
Interno 1

Prof. Dr. Laercio Martins De Mendonca
Interno 2

**Prof. Dr. Humberto Dionisio De Andrade -
UFERSA**
Externo à Instituição 1

Prof. Dr. Magno Medeiros De Araújo - IFRN
Externo à Instituição 2

Natal, RN
2023

Dedico esse trabalho primeiramente às minhas filhas Ana Luísa e Aurora, que mesmo entendendo pouco do que eu fazia se mostraram sempre interessadas e empolgadas com os meus sucessos, ao meu amado enteado Pedro e aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado mesmo nas horas difíceis.

Agradecimentos

A Deus, por iluminar meu caminho e estar sempre ao meu lado. Agradeço-o especialmente pela força e serenidade nos momentos de dificuldade.

Ao Prof. Dr. José Patrocínio da Silva pela confiança atribuída, pelo conhecimento transmitido, pela dedicação, compreensão e orientação.

Em especial ao meu pai Marcos Túlio Antunes Bezerra e à minha mãe Maria Verônica da Silva Bezerra por estarem sempre presentes em minha vida. Agradeço-lhes ainda pelo amor incondicional e por todo o incentivo dado.

À minha filha Ana Luísa Marques Ferreira Bezerra que sempre demonstrou amor e carinho não importando o momento.

Às minhas irmãs Marília Micaele da Silva Bezerra e Mariana da Silva Bezerra pelo carinho e apoio neste momento tão importante de minha vida.

À minha família que mesmo distante esteve sempre presente e me apoiou.

À minha amiga Lígia que me ajudou a revisar algumas partes escritas nesse texto.

A minha namorada, companheira e amiga Esthephania Oliveira Maia Batalha, pelo apoio e incentivo nos momentos difíceis. Obrigado pelo amor e por ser parte essencial de minha vida.

Ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica e Computação (PPgEEC) da UFRN pela oportunidade de vaga de Doutorado oferecida. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Universidade Federal do Rio grande do Norte (UFRN) pelo apoio institucional e financeiro.

Aos professores do PPgEEC pelo conhecimento transmitido, e em especial aos Prof. Dr. Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos, Prof. Dr. Vicente Angelo Sousa, Prof. Dr. Allan De Medeiros Martins, Prof. Dr. Manoel Silva De Vasconcelos e Prof. Dr. Adaildo Gomes D'Assunção pela atenção e disponibilidade.

Aos meus amigos, Sales, Victor, Anaíra, Renato, Arildo, Indira, Felipe e Ednardo pelos momentos proporcionados, compreensão e apoio nos momentos difíceis.

Enfim, a todos que contribuíram de alguma forma para essa conquista.

*“We’ve got to hold on ready or not
You live for the fight when that’s all that you’ve got
(Jon Bon Jovi)*

*“Nós temos que aguentar, preparados ou não
Você vive para a luta quando isso é tudo que lhe resta
(Jon Bon Jovi)*

Resumo

Um dos modelos mais tradicionais de segmentação aplicados em guias de ondas ópticos é a Grade de Bragg, também conhecida como Fibra de Grade de Bragg (FGB), onde o sequenciamento na região de propagação segue um padrão periódico. Mais recentemente, alguns modelos de sequências quase periódicas têm sido aplicados em cristais fotônicos, principalmente considerando os dispositivos com estratificação unidimensional. Neste trabalho, são propostos guias de ondas baseados no direcionamento da luz através de meios com índices de refração sequenciados na direção de propagação. O modelo do núcleo de guiamento das estruturas está fundamentado no sequenciamento quase periódico do índice de refração que forma a região de propagação do sinal. Nesse contexto, modelos de fibras ópticas amplamente conhecidos são modificados para se adequar às estruturas de segmentação das regiões de guiamento do sinal óptico. Foram investigadas estruturas de fracionamento do núcleo de guias de onda, aplicando modelos quase periódicos, como as sequências de Fibonacci, Thue Morse, Período Duplo e Octonacci, com o objetivo de comparar seu desempenho em relação aos guias que usam a Grade de Bragg como estratégia de segmentação. Para esse estudo, foi utilizado o software COMSOL[®] para a simulação dos diversos tipos de segmentação. Foram analisados os parâmetros transmissão e de reflexão nas interfaces entre os diferentes meios que compõem as sequências aplicadas. Os resultados obtidos mostram que há similaridades entre a resposta de transmissão dos guias propostos com os quase cristais fotônicos que foram baseados, porém apresentando absorvância, um fenômeno não anteriormente observado. Outro fator observado nos resultados foi a aplicabilidade desses guias de onda segmentados como sensores térmicos, chegando até mesmo a ter respostas melhores do que a sua contraparte periódica.

Palavras-chaves: Guias de Onda Ópticos, Fibra de Grade de Bragg, Quase-Cristais, COMSOL[®]

Abstract

One of the most traditional segmentation models applied in optical waveguides is the Bragg Grating, also known as Fiber Bragg Grating (FBG), where the sequencing in the propagation region follows a periodic pattern. More recently, some models of quasi-periodic sequences have been applied in photonic crystals, especially considering devices with one-dimensional stratification. In this work, waveguides based on directing light through media with refractive index sequenced in the propagation direction are proposed. The core guiding model of these structures is based on quasi-periodic sequencing of the refractive index that forms the signal propagation region. In this context, well-known optical fiber models are modified to fit the segmentation structures of the signal-guiding regions. Core fracturing structures of waveguide models were investigated by applying quasi-periodic models such as Fibonacci, Thue Morse, Double Period, and Octonacci sequences with the aim of comparing their performance with guides using Bragg Grating as a segmentation strategy. For this study, COMSOL[®] software was used to simulate various types of segmentation. Transmission and reflection parameters at the interfaces between the different media making up the applied sequences were analyzed. The results obtained show similarities between the transmission response of the proposed guides and quasi-photonic crystals they were based on, but with the addition of absorptance, a phenomenon not previously observed. Another factor observed in the results was the applicability of these segmented waveguides as thermal sensors, even showing better responses than their periodic counterparts.

Key-words: Optical Waveguides, Fiber Bragg Grating, Quasicrystals, COMSOL[®]

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Estrutura Cristalina.	6
Figura 2.2 – Exemplos de Cristais Fotônicos encontrados na natureza.	8
Figura 2.3 – Cristais Fotônicos Unidimensionais (superior esquerdo), Bidimensionais (superior direito) e Tridimensionais (inferior).	9
Figura 2.4 – Estrutura de banda fotônica de cristais tridimensionais: esferas de ar em um material com $\varepsilon = 13$ (figura à esquerda) e de um cristal Yablonovite. (figura à direita)	9
Figura 2.5 – Estrutura de banda fotônica de cristais tridimensionais: estrutura pilha de madeira com toras de um material com $\varepsilon = 13$ em ar (superior esquerdo), estrutura opala inversa com esferas de ar em um material com $\varepsilon = 13$ (superior esquerdo) e pilha de cristais bidimensionais (inferior).	10
Figura 2.6 – Estruturas de banda para propagação no eixo computadas para três filmes multicamadas.	12
Figura 2.7 – CFs unidimensionais fabricados com diferentes materiais: (a) Nanopartículas inorgânicas; (b) Argila; (c) e (d) Polímeros puros; e (e) Solução de polímero e Dióxido de Titânio.	13
Figura 2.8 – CFs unidimensionais usando várias abordagens de métodos de fabricação: (a) Spin coating; (b) Fabricação eletrostática camada por camada e (c) Gravação elétrica.	14
Figura 2.9 – (a) Diagrama do esquemático de dispersão na primeira zona de Brillouin do guia de onda periódico com propagação longitudinal e (b) Uma representação equivalente do índice efetivo do modo de Bloch (n_B) do guia de onda periódico como uma função da razão do comprimento de onda com o período de segmentação $\bar{\lambda} = \lambda/\Lambda$	15
Figura 2.10–Diagramas descrevendo o conceito de um acoplador em grade trabalhando como um acoplador de saída: (a) Difração vertical de primeira ordem e difração de segunda ordem em sentido contrário; e (b) Difração inclinada de primeira ordem sem difração de segunda ordem.	16
Figura 2.11–Seção transversal da fibra proposta por Liu, de $Ge_{11.5}As_{24}Se_{64.5}$ com buracos de ar.	17
Figura 2.12–Seção transversal da fibra proposta por Valliammai, de SiO_2 com buracos de ar.	18

Figura 2.13–Seção transversal do acoplador proposto por Guimarães.	18
Figura 2.14–(a) Seção transversal do acoplador proposto por Silva, (b) Matriz básica da ordenação quase periódica e (c) Detalhe do buraco de ar central.	18
Figura 2.15–Transmitâncias para os quase cristais fotônicos seguindo as sequências de Fibonacci (superior esquerdo), Thue-Morse (superior direito) e período duplo (inferior), propostos por (VASCONCELOS; ALBUQUERQUE; MARIZ, 1998).	19
Figura 2.16–Transmitância para o quase cristal fotônico seguindo as sequência de Octonacci proposto por BRANDÃO et al. (2015).	20
Figura 2.17–Ilustração do QCF cilíndrico estudado por Fernandes.	20
Figura 2.18–Transmitância para o quase cristal fotônico seguindo as sequência Generalizada de Fibonacci proposto por ALI et al. (2022).	21
Figura 2.19–Perfil de índice de refração no núcleo para FGB: (a) Uniforme com mudanças de índice positivo apenas; (b) Gorjeado; (c) Apodização gaussiana; (d) Mudança de fase discreta; (e) Apodização cosseno elevado; e (f) Superestrutura.	22
Figura 2.20–Exemplo de resposta espectral para a FGB.	23
Figura 2.21–Exemplo de Fibra de Grade de Bragg.	24
Figura 3.1 – Exemplo de guia de onda óptico com a sequência de Fibonacci.	26
Figura 3.2 – Exemplo de guia de onda óptico com a sequência de Thue-Morse.	26
Figura 3.3 – Exemplo de guia de onda óptico com a sequência de Período Duplo.	26
Figura 3.4 – Exemplo de guia de onda óptico com a sequência de Octonacci.	26
Figura 3.5 – Representação gráfica do modelo adotado para as simulações.	28
Figura 3.6 – Diagrama de blocos da análise do sistema proposto.	30
Figura 4.1 – Reflectância com $k = 3$ para $m = 15$ e $n = 1$ (superior esquerdo) e $k = 4$ para $m = 15$ e $n = 1$ (superior direito), e transmitância com $k = 3$ para $m = 15$ e $n = 1$ (inferior esquerdo) e $k = 4$ para $m = 15$ e $n = 1$ (inferior direito) para o guia de onda proposto.	34
Figura 4.2 – Reflectância com $k = 3$ para $m = 15$ e $n = 1$ (superior esquerdo), $m = 15$ e $n = 5$ (superior direito), $m = 15$ e $n = 10$ (inferior esquerdo) e $m = 15$ e $n = 15$ (inferior direito) para o guia de onda proposto.	35
Figura 4.3 – Transmitância com $k = 3$ para $m = 15$ e $n = 1$ (superior esquerdo), $m = 15$ e $n = 5$ (superior direito), $m = 15$ e $n = 10$ (inferior esquerdo) e $m = 15$ e $n = 15$ (inferior direito) para o guia de onda proposto.	35
Figura 4.4 – Reflectância com $k = 4$ para $m = 15$ e $n = 1$ (superior esquerdo), $m = 15$ e $n = 5$ (superior direito), $m = 15$ e $n = 10$ (inferior esquerdo) e $m = 15$ e $n = 15$ (inferior direito) para o guia de onda proposto.	36

Figura 4.5 – Transmitância com $k = 4$ para $m = 15$ e $n = 1$ (superior esquerdo), $m = 15$ e $n = 5$ (superior direito), $m = 15$ e $n = 10$ (inferior esquerdo) e $m = 15$ e $n = 15$ (inferior direito) para o guia de onda proposto.	36
Figura 4.6 – Reflectância com $k = 4$ para $m = 15$ e $n = 20$ (superior esquerdo) e $m = 15$ e $n = 25$ (superior direito), e transmitância com $k = 4$ para $m = 15$ e $n = 20$ (inferior esquerdo) e $m = 15$ e $n = 25$ (inferior direito) para o guia de onda proposto.	37
Figura 4.7 – Valores da banda proibida central de acordo com o valor de m , com $k = 3$ e $n = 1$, para o guia de onda proposto.	38
Figura 4.8 – Absorvâncias com $k = 3$ para $m = 5$ e $n = 1$ (linha azul) e $m = 95$ e $n = 1$ (linha laranja) para o guia de onda proposto.	39
Figura 4.9 – Reflectância com $k = 3$ para $m = 5$ e $n = 1$ (superior esquerdo), $m = 10$ e $n = 1$ (superior direito), $m = 15$ e $n = 1$ (inferior esquerdo) e $m = 20$ e $n = 1$ (inferior direito) para o guia de onda proposto.	40
Figura 4.10–Transmitância com $k = 3$ para $m = 5$ e $n = 1$ (superior esquerdo), $m = 10$ e $n = 1$ (superior direito), $m = 15$ e $n = 1$ (inferior esquerdo) e $m = 20$ e $n = 1$ (inferior direito) para o guia de onda proposto.	41
Figura 4.11–Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 3$, $m = 95$ e $n = 1$ para o guia de onda proposto.	42
Figura 4.12–Absorvância com $k = 3$, $m = 95$ e $n = 1$ para o guia de onda proposto. . .	42
Figura 4.13–Valores da banda proibida central de acordo com o valor de m , com $k = 3$ e $n = 1$, para o guia de onda proposto.	43
Figura 5.1 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 5$ para o guia de onda proposto.	46
Figura 5.2 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 3$ para o guia de onda proposto.	46
Figura 5.3 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 10$ para o guia de onda proposto.	47
Figura 5.4 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 5$, e os materiais de A e B invertidos, para o guia de onda proposto.	47
Figura 5.5 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 5$ para o guia de onda proposto.	48
Figura 5.6 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 3$ para o guia de onda proposto.	49
Figura 5.7 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 10$ para o guia de onda proposto.	49
Figura 5.8 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 5$ para o guia de onda proposto com a temperatura à $300K$	50

Figura 6.1 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 5$ para o guia de onda proposto.	52
Figura 6.2 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 3$ para o guia de onda proposto.	53
Figura 6.3 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 10$ para o guia de onda proposto.	53
Figura 6.4 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 5$ para o guia de onda proposto.	54
Figura 6.5 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 3$ para o guia de onda proposto.	55
Figura 6.6 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 10$ para o guia de onda proposto.	55
Figura 6.7 – Absorvâncias para $k = 5$ (linha azul) e $k = 10$ (linha laranja) para o guia de onda proposto.	56
Figura 6.8 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 5$ para o guia de onda proposto em uma temperatura de $300K$	57
Figura 6.9 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 13$ para a fibra com a segmentação proposta.	58
Figura 6.10–Comparativo da reflectância da fibra com grade de bragg (linha azul) com a reflectância da grade seguindo a sequência de período duplo (linha laranja).	59
Figura 6.11–Comparativo da absorvância da fibra com grade de bragg (linha azul) com a absorvância da grade seguindo a sequência de período duplo (linha laranja).	59
Figura 6.12–Comparativo da reflectância da fibra com grade seguindo a sequência de período duplo à $295K$ (linha azul) e à $300K$ (linha laranja).	60
Figura 6.13–Comparativo da transmitância da fibra com grade seguindo a sequência de período duplo à $295K$ (linha azul) e à $300K$ (linha laranja).	61
Figura 7.1 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 5$ para o guia de onda proposto.	63
Figura 7.2 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 3$ para o guia de onda proposto.	64
Figura 7.3 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 10$ para o guia de onda proposto.	64
Figura 7.4 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 5$ para o guia de onda proposto.	65
Figura 7.5 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 3$ para o guia de onda proposto.	66
Figura 7.6 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 10$ para o guia de onda proposto.	66

Figura 7.7 – Absorvâncias para $k = 5$ (linha azul) e $k = 10$ (linha laranja) para o guia de onda proposto.	67
Figura 7.8 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 5$ para o guia de onda proposto em uma temperatura de $300K$	68

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros de malha do núcleo e grade.	28
Tabela 2 – Parâmetros de malha das portas.	28
Tabela 3 – Modelos analisados usando a sequência generalizada de fibonacci.	33
Tabela 4 – Parâmetros de simulação do Estudo de Caso 1	33
Tabela 5 – Parâmetros de simulação do Estudo de Caso 2	39
Tabela 6 – Modelos a serem analisados usando a sequência Thue Morse.	45
Tabela 7 – Parâmetros de simulação do Estudo de Caso 3	45
Tabela 8 – Parâmetros de simulação do Estudo de Caso 4	48
Tabela 9 – Modelos a serem analisados usando a sequência de Período Duplo.	51
Tabela 10 – Parâmetros de simulação do Estudo de Caso 5	52
Tabela 11 – Parâmetros de simulação do Estudo de Caso 6	54
Tabela 12 – Parâmetros de simulação do Estudo de Caso 7	57
Tabela 13 – Modelos a serem analisados usando a sequência de Octonacci.	62
Tabela 14 – Parâmetros de simulação do Estudo de Caso 8	63
Tabela 15 – Parâmetros de simulação do Estudo de Caso 9	65

Lista de abreviaturas e siglas

SWG	<i>Subwavelength Grating</i>
BL	<i>Bitrate - distance product</i>
LT	Linhas de Transmissão
CF	Cristal Fotônico
CFU	Cristal Fotônico Unidimensional
QCF	Quase Cristal Fotônico
FGB	Fibra de Grade de Bragg
BPF	Banda Proibida Fotônica
PML	<i>Perfectly Matched Layer</i>

Lista de símbolos

H_m	Componente m do campo magnético
λ	Comprimento de onda
Λ	Período de grade de Bragg
ε	Permissividade elétrica
μ	Permeabilidade magnética
n	Índice de refração
k	Número de onda
a	Constante de rede
W	Largura da BPF
d_A	Largura da camada A da sequência quase periódica adotada pelo guia segmentado
d_B	Largura da camada B da sequência quase periódica adotada pelo guia segmentado

Sumário

	1 INTRODUÇÃO	2
1.1	Histórico	2
1.2	Motivação e Objetivos do Trabalho	3
1.3	Estrutura da Tese	4
	2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1	Cristais	6
2.1.1	Cristais Fotônicos	7
2.1.1.1	Cristais Unidimensionais	11
2.2	Quase-Cristais Fotônicos	17
2.3	Grade de Bragg em Fibra	21
	3 METODOLOGIA E PROPOSTA DO TRABALHO	25
	4 FIBRA ÓPTICA COM NÚCLEO SEGMENTADO OBEDECENDO A SEQUÊNCIA GENERALIZADA DE FIBONACCI	32
4.1	Sequência Generalizada de Fibonacci	32
4.2	Estudo de Caso 1	33
4.2.1	Parâmetros da Simulação	33
4.2.2	Resultados	33
4.3	Estudo de Caso 2	39
4.3.1	Parâmetros da Simulação	39
4.3.2	Resultados	40
	5 FIBRA ÓPTICA COM NÚCLEO SEGMENTADO OBEDECENDO A SEQUÊNCIA THUE MORSE	44
5.1	Sequência Thue Morse	44
5.2	Estudo de Caso 3	44
5.2.1	Parâmetros da Simulação	44
5.2.2	Resultados	45
5.3	Estudo de Caso 4	47
5.3.1	Parâmetros da Simulação	47
5.3.2	Resultados	48

6	FIBRA ÓPTICA COM NÚCLEO SEGMENTADO OBEDECENDO A SEQUÊNCIA DE PERÍODO DUPLO	51
6.1	Sequência de Período Duplo	51
6.2	Estudo de Caso 5	52
6.2.1	Parâmetros da Simulação	52
6.2.2	Resultados	52
6.3	Estudo de Caso 6	54
6.3.1	Parâmetros da Simulação	54
6.3.2	Resultados	54
6.4	Estudo de Caso 7	57
6.4.1	Parâmetros da Simulação	57
6.4.2	Resultados	57
7	FIBRA ÓPTICA COM NÚCLEO SEGMENTADO OBEDECENDO A SEQUÊNCIA DE OCTONACCI	62
7.1	Sequência de Octonacci	62
7.2	Estudo de Caso 8	63
7.2.1	Parâmetros da Simulação	63
7.2.2	Resultados	63
7.3	Estudo de Caso 9	65
7.3.1	Parâmetros da Simulação	65
7.3.2	Resultados	65
8	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	69
8.1	Conclusões	69
8.2	Trabalhos Futuros	70
	REFERÊNCIAS	71

Capítulo 1

Introdução

1.1 Histórico

Desde o início da humanidade, o homem tenta manipular propriedades da natureza, como a mecânica, a eletricidade, a química, a luz, entre outros. Essa busca foi o que possibilitou o avanço da tecnologia e consequentemente da sociedade como nós conhecemos. Basta lembrar que as primeiras ferramentas eram propriamente materiais diretamente extraídos do ambiente em que viviam, dado a pedra lascada que serviam para corte e caça.

Com o tempo se viu a necessidade de estudar as propriedades dos materiais, tanto para se ter ferramentas mais resistentes, quanto para se fabricar novas ferramentas que deixariam a vida humana mais confortável e duradoura. Os primeiros pesquisadores viram que ao se manipular alguns componentes, era possível chegar a esse objetivo e assim extraíram metais do solo e rochas, derreteram e formaram novos utensílios, dando início à Idade do Bronze.

A utilização da luz também se desenvolveu durante todo o período da história da humanidade, sendo gerada inicialmente por meio da incandescência do fogo tanto para iluminação do local, quanto para comunicações em médias distâncias.

Na comunicação, durante certo período a óptica perdeu um pouco o espaço para outros meios, como as cartas e ondas eletromagnéticas de frequência mais baixa. A partir da necessidade de aumento do produto taxa de bits – distância BL (*Bitrate – distance product*) em várias ordens de magnitude (SALEH; TEICH, 2007), foram estudados novos meios de atingir esse objetivo. Uma possibilidade encontrada foi guiar a luz por meio de materiais dielétricos. Então em 1956, concebeu-se o termo fibra óptica para definir esse material guiante (FERNANDES, 2003).

Outros materiais estudados com o tempo foram os cristais. Percebeu-se que ao se aplicar ondas na faixa de Raio-X em materiais que possuíam periodicidade em seus átomos, íons ou moléculas, o fenômeno da difração era obtido.

Esses conceitos foram mais amplamente estudados por Lawrence Bragg e seu pai William Henry Bragg em 1913 (BRAGG; BRAGG, 1913), que foram os primeiros a estudar os

padrões que esses materiais teriam para refletir determinadas frequências de radiação, enquanto outras não eram refletidas. A partir disso foi desenvolvida a **Lei de Bragg** para cristais. Posteriormente, no Capítulo 2, será feita uma discussão mais aprofundada sobre a lei de Bragg e como ela afeta os materiais ópticos.

Em paralelo a esse estudo, também foram observados na natureza materiais que refletiam luz de apenas uma banda de frequência, formando as chamadas *Bandas Proibidas*. O nome dado a esse tipo de componente foi Cristal Fotônico. Esse dispositivo é composto por diferentes materiais (comumente dois) que possuem índices de refração diferentes, organizados de forma periódica. Conforme as dimensões que essa periodicidade pode tomar, os Cristais Fotônicos podem ser divididos em três tipos (JOANNOPOULOS et al., 2008):

- Unidimensionais
- Bidimensionais
- Tridimensionais

O fenômeno da reflexão de uma banda de frequência óptica em um material com multicamadas dielétricas, distribuídas de forma unidimensional, foi primeiramente observado por Lord Rayleigh, em 1887, e desde então vem sendo base para diversos dispositivos, como espelhos dielétricos, filtros dielétricos de Fabry-Perot e lasers de feedback distribuídos (JOANNOPOULOS et al., 2008).

Há também cristais que possuem uma quase-periodicidade nos elementos que o compõem. Esses materiais são os Quase-Cristais Fotônicos, descobertos por Dan Shechtman em 1984 (SHECHTMAN et al., 1984) e desde então vem sendo foco de estudos em diversos trabalhos na área de fotônica (VASCONCELOS; ALBUQUERQUE; MARIZ, 1998; ARAÚJO et al., 2012; BRANDÃO et al., 2015; VASCONCELOS; COTTAM, 2019), destacando-se aqui aqueles que usam as sequências de Fibonacci, Octonacci e Thue–Morse.

Em 1978 observou-se a possibilidade da aplicação de cristais fotônicos, mais especificamente a grade de Bragg, em fibras ópticas (HILL et al., 1978). As grades foram inicialmente obtidas ao se aplicar um laser visível no núcleo da fibra. Daí em diante, outras técnicas de se obter a grade de Bragg em Fibras Ópticas foram estudadas e desenvolvidas (MELTZ; MOREY; GLENN, 1989; THIEL; FLACHENECKER; SCHADE, 2015; AHMED et al., 2021; JANTZEN et al., 2021).

1.2 Motivação e Objetivos do Trabalho

Como consequência do desenvolvimento da fibra óptica e da expansão dos estudos da fotônica, percebeu-se a possibilidade do uso desses componentes para a resolução de diversos problemas, que não se limitavam à área de comunicação.

Observou-se que ao modificar o núcleo da fibra, segmentando-a, era possível expandir suas aplicações. Nesse contexto, o modo mais utilizado nessa categoria de segmentação é aquela que emprega a lei de Bragg como base, formando uma sequência periódica.

Nesse contexto, verifica-se a utilização da Fibra de Grade de Bragg (FGB) em diferentes áreas da fotônica, incluindo desde a utilização como filtros em comunicação, até a composição de lasers. De outra forma, também destaca-se o uso da FGB em sensores, com ênfase nos sensores químicos e mecânicos.

Nessa perspectiva, este trabalho propõe o uso de diferentes sequências quase-periódicas como forma de segmentar o núcleo de uma fibra padrão monomodo e estudar sua resposta em comparação à FBG. Com esse objetivo, serão utilizados o programa de simulação COMSOL® e um algoritmo que irá possibilitar a mudança automática do padrão de segmentação da fibra de acordo com a sequência escolhida.

Com a finalidade de atingir esse objetivo geral, foram levantados estes objetivos específicos:

- Entender como se comportam as Fibras de Grade de Bragg e suas possíveis aplicações;
- Familiarizar-se com as metodologias usadas por outros trabalhos que abordam a segmentação quase periódica em cristais;
- Adaptar técnicas e metodologias usadas por outros trabalhos que estudam quase-cristais para a fibra segmentada proposta por esta tese;
- Comparar a sua resposta com a FBG.

1.3 Estrutura da Tese

O segundo capítulo deste trabalho dedica-se à elaboração de uma revisão bibliográfica abrangente, visando proporcionar uma compreensão sólida das ferramentas e conhecimentos fundamentais que constituem a base do estudo desenvolvido. Neste contexto, são examinadas e sintetizadas as contribuições científicas e técnicas relevantes, proporcionando um contexto aprofundado para o desenvolvimento do trabalho.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia que serve como alicerce para a pesquisa. Este tema será explorado de maneira mais detalhada na proposta da pesquisa, delineando os métodos e abordagens adotadas para realizar as simulações e análises posteriormente discutidas nos capítulos subsequentes.

Os capítulos 4, 5, 6 e 7 são dedicados à apresentação dos guias de onda estudados e à análise aprofundada dos resultados obtidos nas simulações. Cada capítulo aborda uma sequência quase periódica específica aplicada aos guias de onda segmentados, destacando as características distintivas e o desempenho observado em diferentes cenários e configurações.

Finalmente, o Capítulo 8 compreende as conclusões e considerações finais deste trabalho. Aqui, são discutidas as principais descobertas, implicações e relevâncias práticas dos resultados obtidos ao longo da pesquisa. Além disso, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros, delineando caminhos potenciais para a expansão e aprofundamento desta linha de pesquisa, promovendo a continuidade e a evolução do conhecimento na área. Este capítulo, portanto, fecha o ciclo da pesquisa, consolidando os resultados e indicando direções para pesquisas subsequentes.

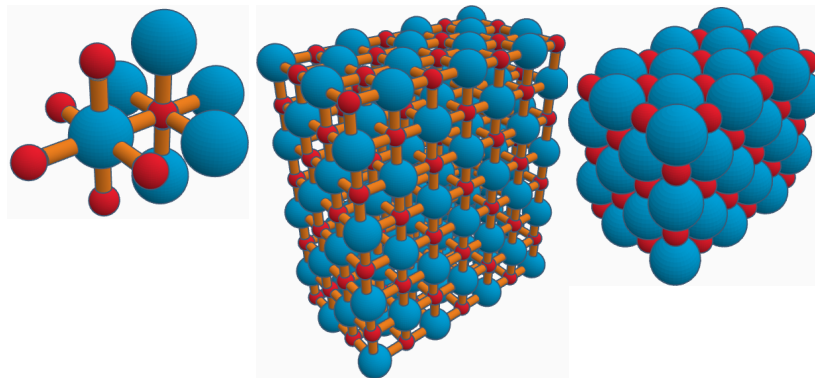
Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Cristais

Os cristais são materiais que possuem periodicidade em sua composição, seja nos átomos, íons ou moléculas (ARAÚJO, 2012). Na Figura 2.1 é possível observar como ficariam organizados esses elementos.

Figura 2.1 – Estrutura Cristalina.



Fonte: Produzido pelo autor.

Essa rede cristalina foi primeiramente observada no final do século XIX por mineralogistas, sendo posteriormente confirmada ao se observar o fenômeno da difração dos raios-X quando os mesmos atingiam os cristais (ARAÚJO, 2012).

Percebeu-se também que elétrons em um cristal se propagava como onda, e que certas ondas eram impedidas de se propagar de cristal de acordo com a sua energia. Com isso, é possível observar que uma certa lacuna de energia é formada, chamada de Banda Proibida (JOANNOPOULOS et al., 2008).

O estudo de cristais se tornou cada vez mais relevante, principalmente com a formulação da teoria, desenvolvida pelo físico Max Von Laue, que explicava como o Raio-X difratava ao atingir um material cristalino (ECKERT, 2012).

Em seguida, se deu a lei de Bragg (BRAGG; BRAGG, 1913), que determinava qual a

relação da distância dos planos vizinhos e da angulação de incidência da onda, com o comprimento da onda a ser refletida.

A forma matemática da lei de Bragg é:

$$2d \sin(\theta) = n\lambda \quad (2.1)$$

No qual d é a distância entre planos, θ é o ângulo do raio incidente e n é a quantidade de comprimentos de onda λ .

É importante adicionar que a luz, por ser também uma radiação eletromagnética e possuir um caráter corpuscular (o fóton), apresenta essas duas maneiras de agir nas transições eletrônicas do cristal (EISBERG, 1961; COHEN-TANNOUDJI; DIU; LALOE, 1978).

Dessa forma, é possível utilizar os princípios da mecânica quântica para relacionar a energia do fóton com a sua frequência da seguinte forma:

$$E_{foton} = h\omega \quad (2.2)$$

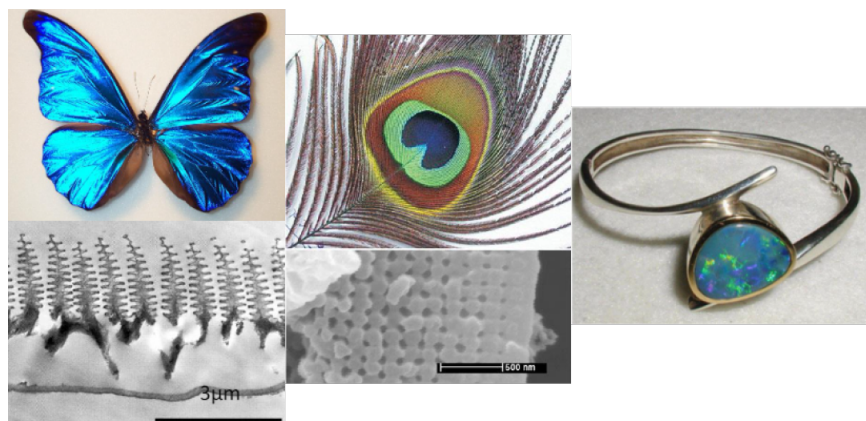
No qual E_{foton} é a energia do fóton, h é a constante de Planck e ω é a frequência angular.

2.1.1 Cristais Fotônicos

Similar aos Cristais, para a óptica se tem os **Cristais Fotônicos** (CF), que ao invés das moléculas, essas estruturas variam espacialmente de forma periódica os materiais que as compõe, tendo assim o seu índice de refração alternando-se em um determinado intervalo (BRANDÃO et al., 2015).

A origem desses materiais não é necessariamente artificial, sendo encontrado na natureza tanto em sistemas físicos, como biológicos (SALEH; TEICH, 2007). Esses CFs se deram a partir de uma evolução de milhões de anos, e são responsáveis por algumas cores exóticas encontradas em insetos e animais (PREBLE; LIPSON; LIPSON, 2004), como é mostrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Exemplos de Cristais Fotônicos encontrados na natureza.



Fonte: Adaptado de (FILHO, [s.d.]).

Essas estruturas foram originalmente propostas, com esse nome, pelos trabalhos de Yablonoitch (YABLONOVITCH, 1987) e John (JOHN, 1987), o que deu início a uma intensificação no estudo desse tipo de material. Porém, o estudo dessas estruturas começaram bem antes, mais precisamente em 1887, quando o Lord Rayleigh observou a propagação de onda em estruturas periódicas (RAYLEIGH, 1887). Nesse trabalho, ele observou que ao incidir uma onda eletromagnética proveniente de um ponto de luz em um mineral cristalino, que possuía planos periódicos organizados de forma unidimensional, resultaria em uma variedade de cores de acordo com a angulação que o feixe de luz penetrava e eram refletidos no material.

Apenas em 1972, que se houve um maior avanço nos estudos dessas estruturas. O trabalho de Bykov (BYKOV, 1972) levantava a possibilidade do uso de estruturas periódicas para o controle de emissões espontâneas.

Os cristais fotônicos desempenham um papel crucial ao influenciar a propagação de ondas ópticas, operando de maneira análoga aos cristais tradicionais. Esses dispositivos refletem determinadas frequências de ondas ópticas nas interfaces entre materiais de diferentes índices de refração, enquanto possibilitam a transmissão de ondas ópticas em outras frequências específicas. Este comportamento distintivo é central para a formação da chamada **Banda Proibida Fotônica**, um fenômeno essencial no contexto da fotônica (SALEH; TEICH, 2007).

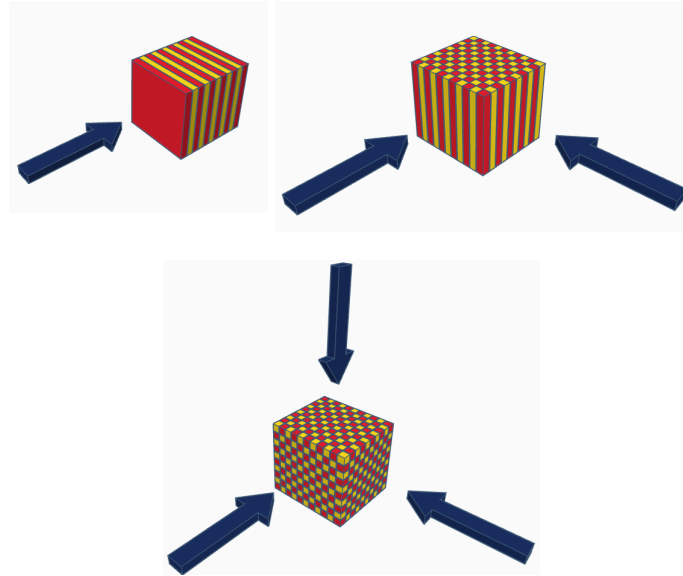
De acordo com a quantidade dos eixos que os cristais fotônicos possuem periodicidade nos índices de refração, esses materiais podem ser divididos em três tipos (JOANNOPOULOS et al., 2008):

- Unidimensionais;
- Bidimensionais;
- Tridimensionais.

Na Figura 2.3 é possível observar como se daria a composição desses três tipos de cristais

fotônicos.

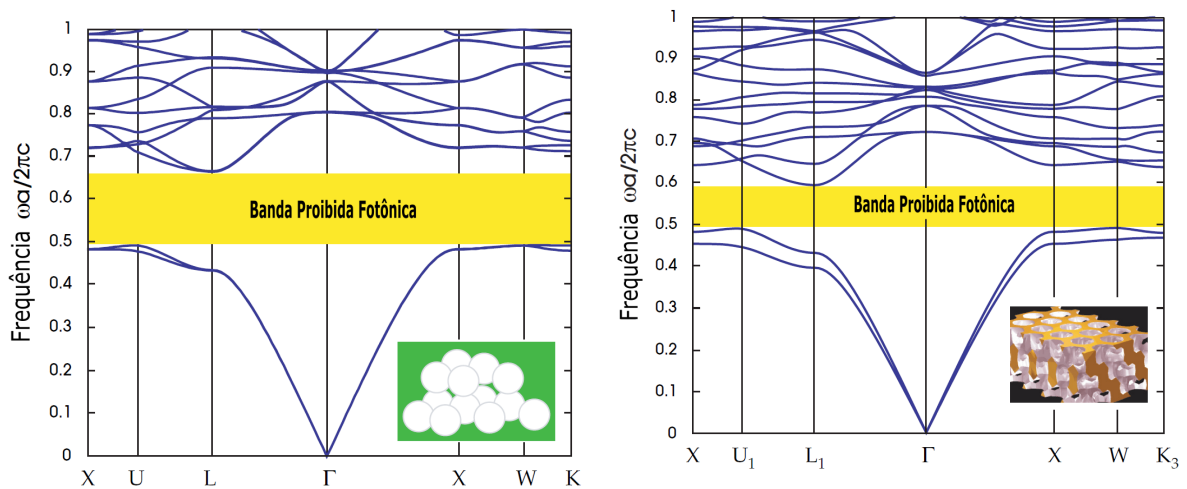
Figura 2.3 – Cristais Fotônicos Unidimensionais (superior esquerdo), Bidimensionais (superior direito) e Tridimensionais (inferior).



Fonte: Adaptado de (JOANNOPOULOS et al., 2008).

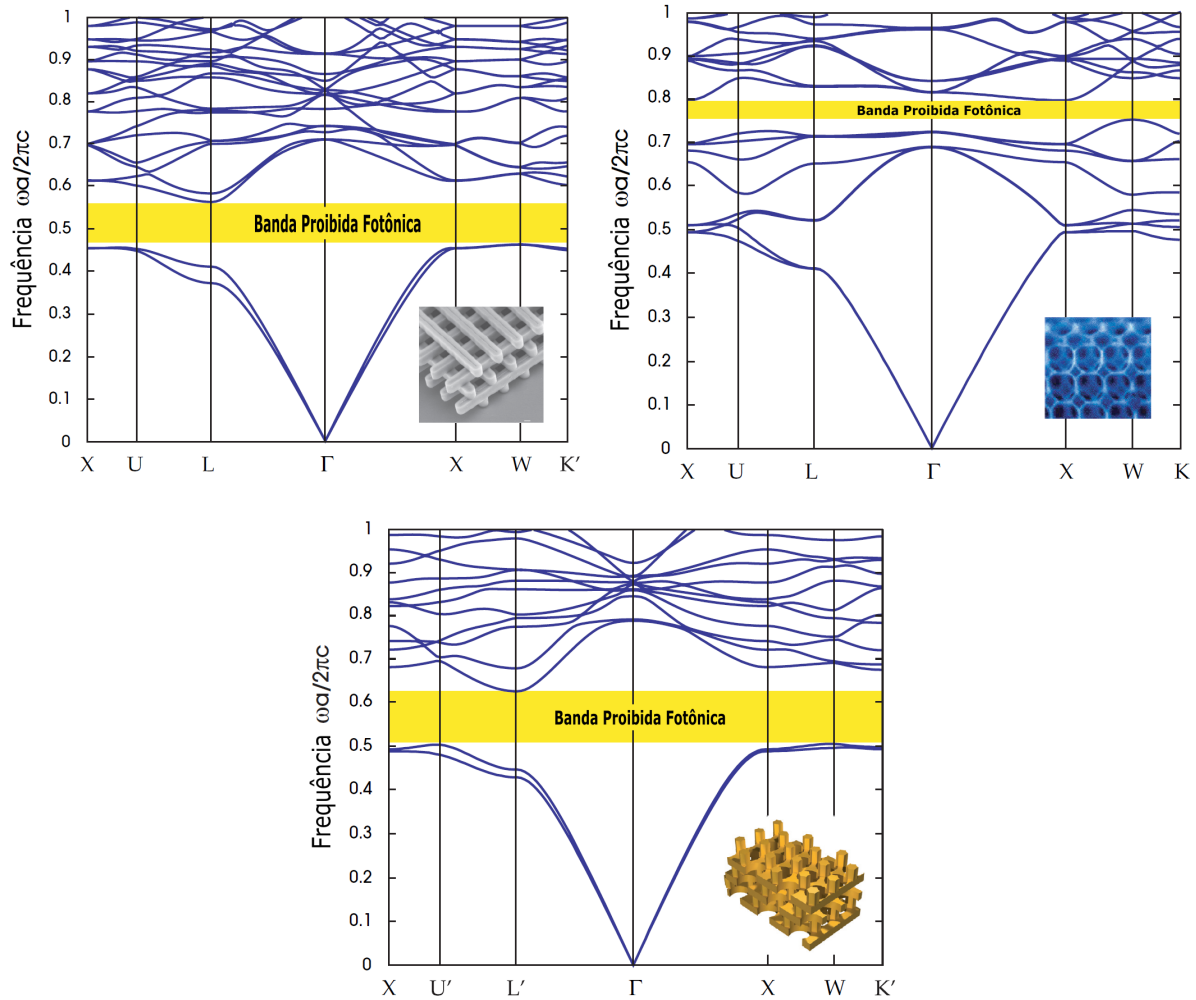
No caso dos CFs tridimensionais, quando possuem banda proibida em todas as direções de propagação, é dito que eles detêm uma **Banda Proibida Fotônica Completa** (JOANNOPOULOS et al., 2008). Abaixo podemos ver exemplos de estruturas de banda fotônica para Cristais Fotônicos tridimensionais que possuem banda proibida fotônica completa:

Figura 2.4 – Estrutura de banda fotônica de cristais tridimensionais: esferas de ar em um material com $\varepsilon = 13$ (figura à esquerda) e de um cristal Yablonovite. (figura à direita)



Fonte: Adaptado de (JOANNOPOULOS et al., 2008)

Figura 2.5 – Estrutura de banda fotônica de cristais tridimensionais: estrutura pilha de madeira com toras de um material com $\varepsilon = 13$ em ar (superior esquerdo), estrutura opala inversa com esferas de ar em um material com $\varepsilon = 13$ (superior esquerdo) e pilha de cristais bidimensionais (inferior).



Fonte: Adaptado de (JOANNOPOULOS et al., 2008)

Algumas aplicações de cristais fotônicos bidimensionais são: em fibras ópticas (ALAM et al., 2021; FALAH; WONG; Mahamd Adikan, 2022), em guias de onda (NAKAO et al., 2002; BILAL et al., 2020), circuitos ópticos integrados (BENISTY et al., 1999; MOCK; LU, 2010) e sensores (YE et al., 2013).

Já para cristais fotônicos tridimensionais ainda existem poucas aplicações, tendo em vista a sua dificuldade de fabricação (SWAIN; PALAI, 2016). Porém algumas aplicações ainda se destacam, como sensores para medir hemoglobina (PALAI; DHIR, 2015) e guia de ondas não irradiantes (KAWAKAMI et al., 1999).

Mais a frente, na subseção 2.1.1.1, serão discutidas possíveis aplicações para cristais unidimensionais.

2.1.1.1 Cristais Unidimensionais

Os Cristais Fotônicos Unidimensionais (CFU) consistem apenas de camadas alternadas com materiais de constantes dielétricas ε diferentes em uma só direção ($\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2$), dessa forma criando um filme de múltiplas camadas. Essa característica torna esse tipo de CF o mais fácil de ser fabricado (JOANNOPOULOS et al., 2008).

A análise desses cristais fotônicos geralmente incorpora a consideração de múltiplas reflexões e transmissões em cada interface dos materiais que compõem o cristal. Este cenário complexo reflete a interação intrincada entre as ondas ópticas incidentes e as propriedades estruturais do cristal, resultando em padrões distintos de reflexão e transmissão ao longo do material.

Ao abordar esse fenômeno, é essencial levar em conta não apenas as reflexões e transmissões na interface inicial, mas também os efeitos cumulativos desses processos ao longo do cristal fotônico. Cada reflexão e transmissão contribui para a formação da **Banda Proibida Fotônica** e influencia diretamente as características ópticas do cristal em relação às diferentes frequências das ondas incidentes.

Considerando-se que a periodicidade do material se dá apenas na direção z , então é possível considerar que $\vec{k}_{\parallel}$ é o vetor de onda do plano xy e k_z é o vetor de onda na direção z . Dessa forma é possível escrever os modos, de acordo com o teorema de Bloch da seguinte forma (JOANNOPOULOS et al., 2008):

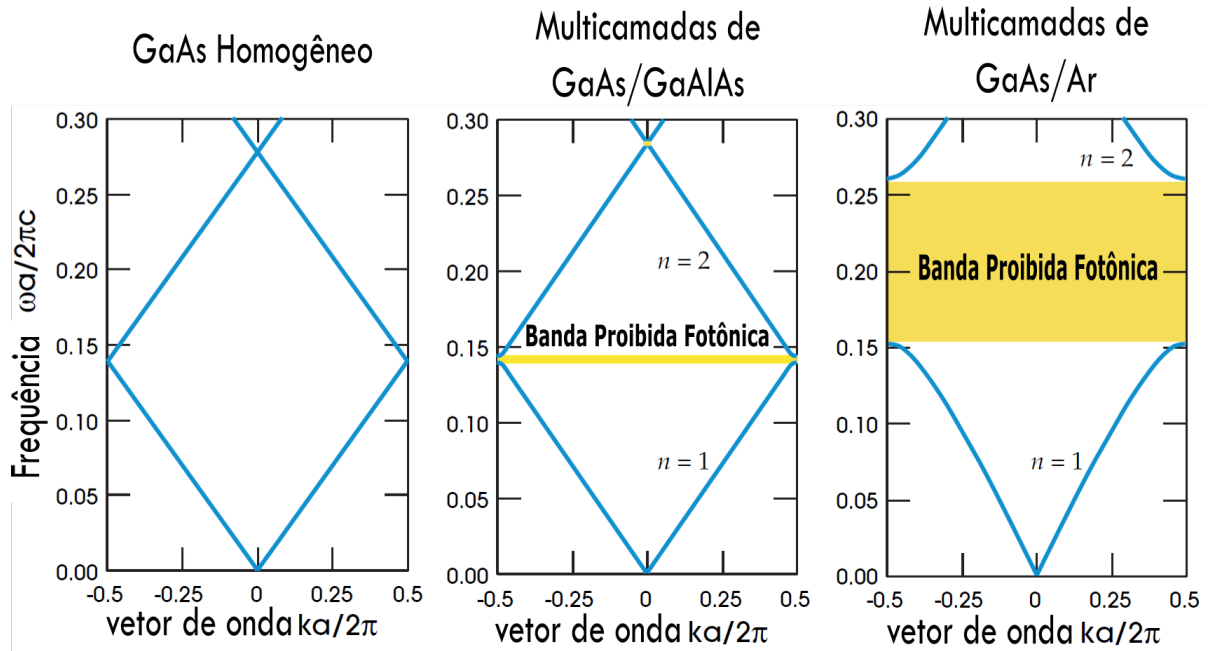
$$\vec{H}_n(x, y, z) = \vec{h}_n(x, y, z) e^{j\vec{k}_{\parallel} \cdot \vec{\rho}} e^{jk_z z} \quad (2.3)$$

no qual n é o número do modo.

Por o cristal só possuir simetria translacional discreta na direção z , então a zona de Brillouin do mesmo será $-\pi/a < k_z \leq \pi/a$, no qual a é a constante de rede. Também, ao considerar a onda se propagando apenas na direção z , então $\vec{k}_{\parallel} = 0$ e apenas k_z é importante para a análise.

Tendo em vista esse tipo de propagação, ao se analisar a Figura 2.6 é possível observar que quanto maior for o contraste entre ε_1 e ε_2 , maior será a Banda Proibida Fotônica.

Figura 2.6 – Estruturas de banda para propagação no eixo computadas para três filmes multicamadas.



Fonte: Adaptado de (JOANNOPOULOS et al., 2008)

É possível calcular tanto a posição, quanto a largura da BPF usando as seguintes equações (KINOSHITA; YOSHIOKA, 2005; CALVO et al., 2011; GE; YIN, 2011):

$$m\lambda_{Bragg} = 2a\sqrt{n_{eff}^2 - \sin^2\theta} \quad (2.4)$$

$$W = \frac{4}{\pi}\lambda_{Bragg} \left| \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right| \quad (2.5)$$

no qual m é a ordem de difração, θ é o ângulo de incidência da onda, W é a largura da BPF e n_{eff} é o índice de refração efetivo, que pode ser estimado como:

$$n_{eff} = \frac{n_1 d_1 + n_2 d_2}{d_1 + d_2} \quad (2.6)$$

Existem vários materiais que podem ser usados para a fabricação de CFs unidimensionais, de forma que eles podem ser separados normalmente em três categorias (SHEN et al., 2015):

- Materiais Inorgânicos
- Materiais Orgânicos
- Materiais Híbridos

Uma das Principais formas de se obter um CFU com materiais inorgânicos é por intermédio de pilhas alternadas de SiO_2 e TiO_2 (FUERTES et al., 2008; KURT et al., 2009). Com apenas 8 pares é possível chegar a reflexões maiores do que 80%. Isso ocorre devido a alta diferença de índice de refração entre os dois materiais, já que $n_{SiO_2} = 1,46$ e $n_{TiO_2} = 2,35$ (SHEN et al., 2015).

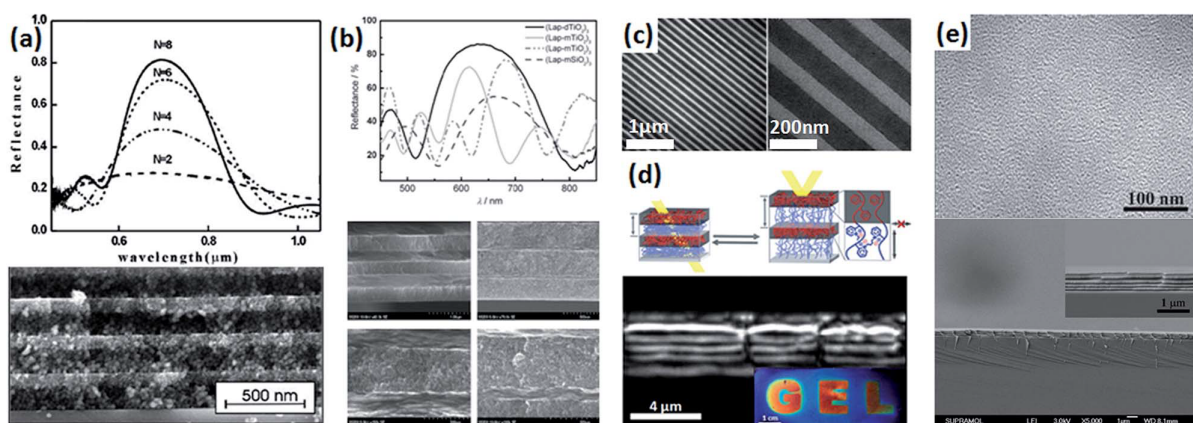
Na Figura 2.7 (a) é possível observar um cristal fotônico desse tipo desenvolvido em (COLODRERO; OCAÑA; MÍGUEZ, 2008).

Também podem ser citados outros materiais inorgânicos na fabricação de CFU, como SnO_2 , ATO, ZnO , Fe_2O_3 (PUZZO et al., 2009; REDEL et al., 2011; CHEN et al., 2009) e até mesmo argila (LOTSCH; OZIN, 2008). Um exemplo de cristal fotônico com argila pode ser visto na Figura 2.7 (b).

Os polímeros também têm um bom desempenho na fabricação de CFU (Cohen Stuart et al., 2010). Os principais polímeros usados são PMMA, PS, PE e PET (CHENG et al., 2006; KAZMIERCZAK et al., 2007; BOCKSTALLER; KOLB; THOMAS, 2001). Exemplos de cristais fotônicos com polímero puro podem ser vistos nas Figuras 2.7 (c) e (d).

Já CFUs com materiais híbridos são normalmente usados quando se procura apenas contraste de índice de refração. Alguns exemplos em destaque são os desenvolvidos por (KARAMAN; KOOI; GLEASON, 2008) e por (WANG et al., 2010), que pode ser visto na Figura 2.7 (e), com PHEMA e TiO_2 .

Figura 2.7 – CFs unidimensionais fabricados com diferentes materiais: (a) Nanopartículas inorgânicas; (b) Argila; (c) e (d) Polímeros puros; e (e) Solução de polímero e Dióxido de Titânio.



Fonte: Adaptado de (SHEN et al., 2015)

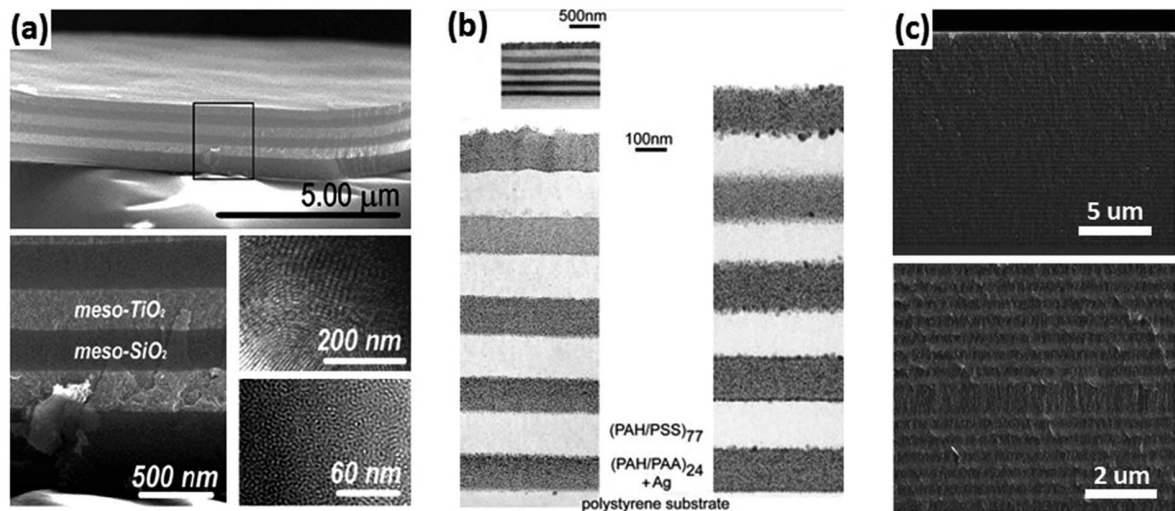
Quanto aos métodos de fabricação, existem alguns tipos que se destacam (SHEN et al., 2015):

- *Spin coating*;
- Fabricação eletrostática camada por camada;

- Gravação (elétrica e química);
- Evaporação;
- Epitaxia por feixe molecular.

Na Figura 2.8 é possível observar CFUs derivados de alguns desses processos.

Figura 2.8 – CFs unidimensionais usando várias abordagens de métodos de fabricação: (a) Spin coating; (b) Fabricação eletrostática camada por camada e (c) Gravação elétrica.



Fonte: Adaptado de (SHEN et al., 2015)

O processo mais difundido dentre esses é o spin coating (SHEN et al., 2015). Isso se dá, pois tem-se a possibilidade de aplica-lo em uma extensa gama de materiais, que incluem soluções de nano partículas (PUZZO et al., 2009), soluções precursoras inorgânicas (ALMEIDA; GONÇALVES; PORTAL, 2003) e soluções de polímeros (KOMIKADO et al., 2007).

Já quanto às suas aplicações, é possível destacar algumas utilizações para quando a BPF é localizada na região visível, sendo elas:

- Refletores de alta eficiência (BRUYANT et al., 2003)
- Sensores químicos e físicos (SANCHEZ-SOBRADO et al., 2011; FRASCELLA et al., 2013)
- Display de cores dinâmicas (LEE; HA, 2011)

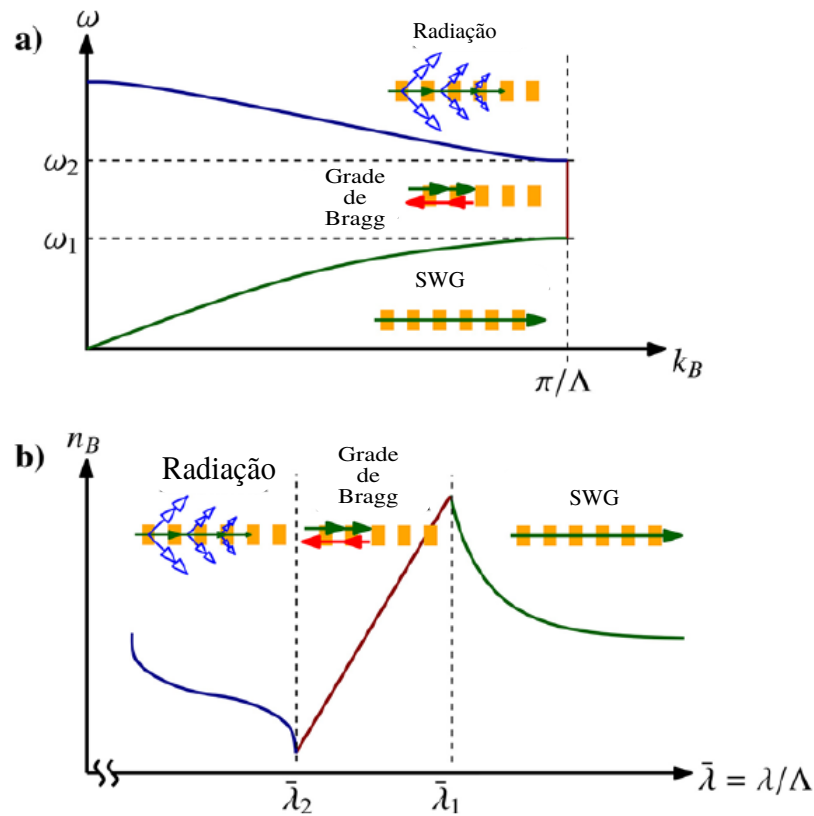
Isso se dá, pois esses tipos de CFUs apresentam cores claras e com alta saturação (SHEN et al., 2015).

Os cristais fotônicos unidimensionais possuem três faixas de operação (HAN, 2018), como mostra na Figura 2.9:

- Regime de Difração, quando ocorrerá a radiação parcial da onda

- Regime de Reflexão de Bragg, quando a onda é refletida
- Regime SWG (*Subwavelength Grating*), quando o cristal se comporta de forma similar à um guia de onda

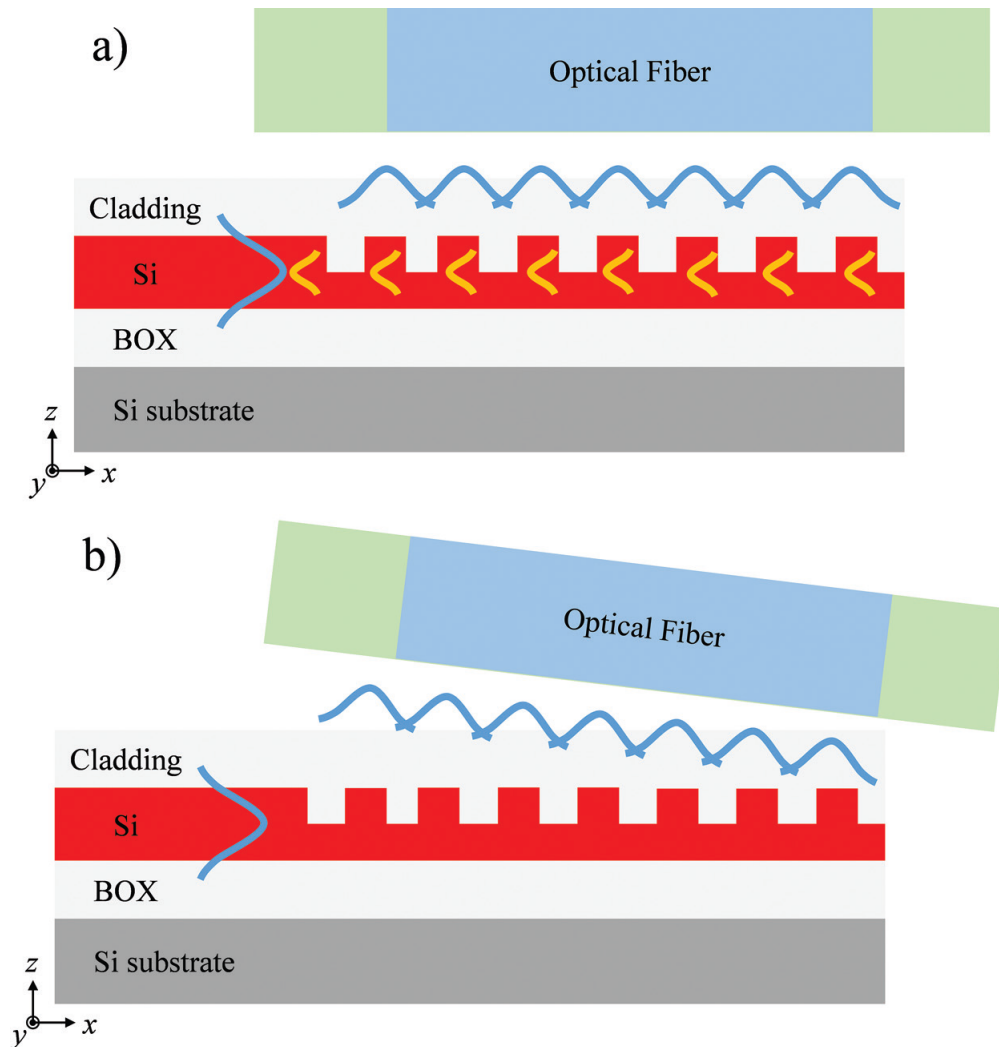
Figura 2.9 – (a) Diagrama do esquemático de dispersão na primeira zona de Brillouin do guia de onda periódico com propagação longitudinal e (b) Uma representação equivalente do índice efetivo do modo de Bloch (n_B) do guia de onda periódico como uma função da razão do comprimento de onda com o período de segmentação $\bar{\lambda} = \lambda/\Lambda$



Fonte: Adaptado de (HALIR et al., 2015).

Os CFUs pode ser usados no regime de difração como acopladores ópticos (LAERE et al., 2007), como é mostrado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Diagramas descrevendo o conceito de um acoplador em grade trabalhando como um acoplador de saída: (a) Difração vertical de primeira ordem e difração de segunda ordem em sentido contrário; e (b) Difração inclinada de primeira ordem sem difração de segunda ordem.



Fonte: Adaptado de (HAN, 2018)

Já no regime SWG, os CFUs podem ser aplicados em guias de onda com alto contraste de índice de refração entre a casaca e o núcleo. Esse alto contraste pode provocar espalhamento na interface da casaca com o núcleo ao menor defeito. Ao se segmentar o núcleo, o campo da onda transmitida se expande, concentrando menos energia nessa interface (GONÇALVES; ISAYAMA; HERNÁNDEZ-FIGUEROA, 2016).

Por fim, no regime de reflexão de Bragg, os mesmos podem ser usados em lasers, polarizadores e sensores (HAN, 2018).

2.2 Quase-Cristais Fotônicos

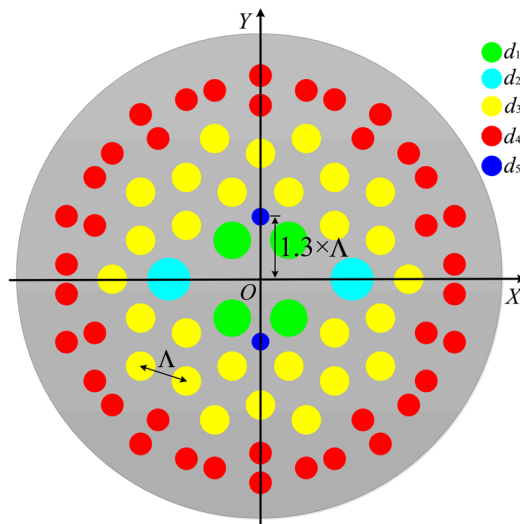
Os quase-cristais fotônicos (QCF) são materiais que possuem a distribuição de seu índice de refração seguindo um padrão quase-periódico, ao invés da habitual sequência periódica encontrada nos cristais fotônicos. Normalmente, esses dispositivos seguem um encadeamento já conhecido, como Fibonacci e Octonacci.

Esses tipos de materiais foram inicialmente estudados por Dan Shechtman et al. em 1984 (SHECHTMAN et al., 1984), porém o mesmo só veio receber reconhecimento, por meio do Prêmio Nobel em Química, em 2011.

Desde então, grande foi o avanço no estudo desses tipos de materiais ao longo dos anos. Para o caso dos quase-cristais unidimensionais, comumente é usado a teoria da matriz de múltiplas camadas ópticas para analisá-los.

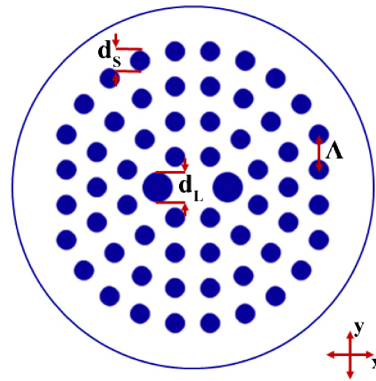
Para os quase-cristais bidimensionais, se destacam o uso do mesmo na fabricação da seção transversal de fibras ópticas. Trabalhos como o Hongfei Liu et al. (LIU et al., 2016) e M. Valliammai et al. (VALLIAMMAI; SIVABALAN, 2017) focam no guiamento de onda ao longo da fibra, usando esse tipo de padrão. Nas Figuras 2.11 e 2.12 é possível observar a estrutura proposta por esses dois trabalhos.

Figura 2.11 – Seção transversal da fibra proposta por Liu, de $Ge_{11.5}As_{24}Se_{64.5}$ com buracos de ar.



Fonte: Adaptado de (LIU et al., 2016)

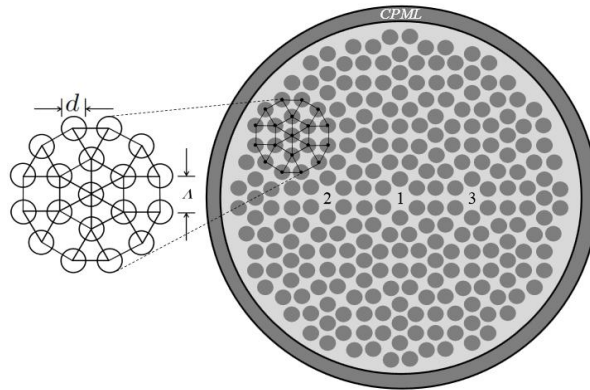
Figura 2.12 – Seção transversal da fibra proposta por Valliammai, de SiO_2 com buracos de ar.



Fonte: Adaptado de (VALLIAMMAI; SIVABALAN, 2017)

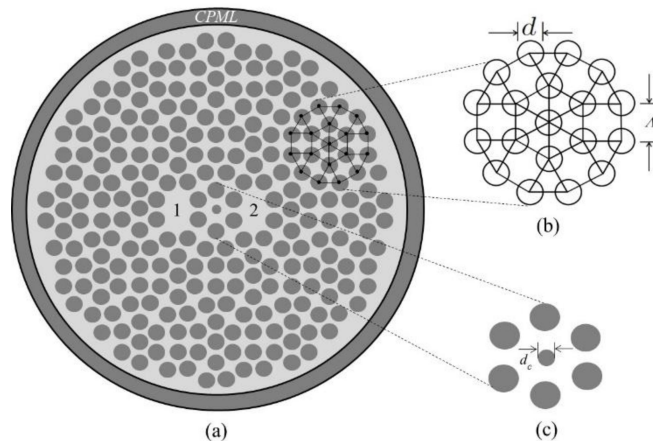
Já nos trabalhos de Guimarães et al. (GUIMARÃES; Da Silva; DANTAS, 2015) e Silva et al. (SILVA; SANTOS; SEGUNDO, 2018), esses tipos de dispositivos são usados como acopladores. Nas Figuras 2.13 e 2.14 é possível observar a estrutura proposta por esses dois trabalhos.

Figura 2.13 – Seção transversal do acoplador proposto por Guimarães.



Fonte: Adaptado de (GUIMARÃES; Da Silva; DANTAS, 2015)

Figura 2.14 – (a) Seção transversal do acoplador proposto por Silva, (b) Matriz básica da ordenação quase periódica e (c) Detalhe do buraco de ar central.

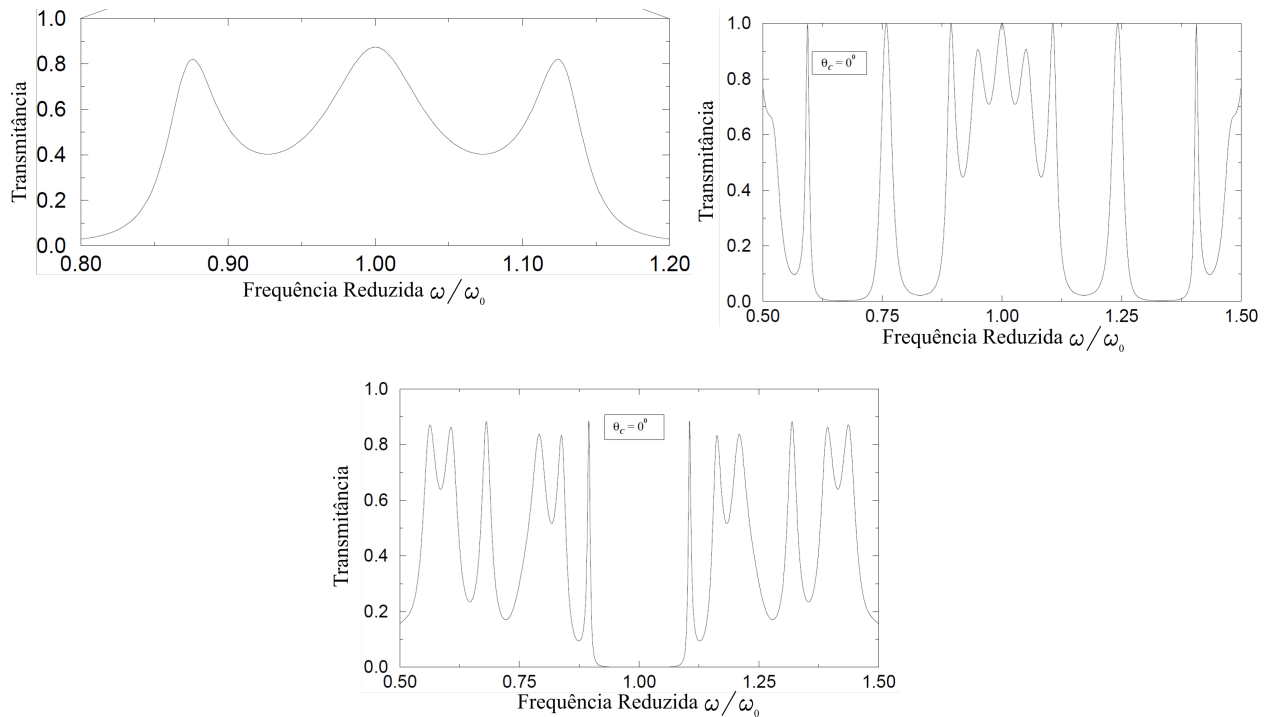


Fonte: Adaptado de (SILVA; SANTOS; SEGUNDO, 2018)

É importante, também, comentar o trabalho de Chu et al. (CHU et al., 2019), que usa esse tipo de fibra como sensor óptico para análise de líquidos.

Já para quase cristais unidimensionais, existem vários trabalhos promissores. No trabalho de Vasconcelos et al., de 1998 (VASCONCELOS; ALBUQUERQUE; MARIZ, 1998), são abordados possíveis QCF que obedecem as sequências de Fibonacci, Thue-Morse e período duplo. As respostas da transmitância para esses quase cristais podem ser vistos na Figura 2.15. Recentemente, Santiago et al. (SANTIAGO et al., 2021) dariam continuidade a esse estudo, só que agora analisando ondas no espectro visível.

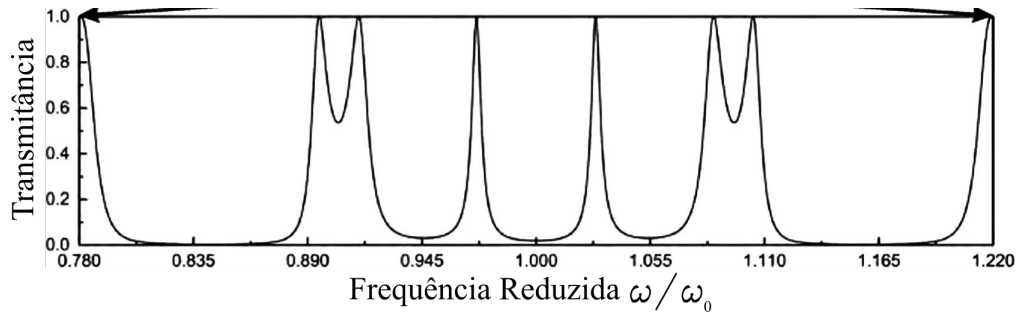
Figura 2.15 – Transmitâncias para os quase cristais fotônicos seguindo as sequências de Fibonacci (superior esquerdo), Thue-Morse (superior direito) e período duplo (inferior), propostos por (VASCONCELOS; ALBUQUERQUE; MARIZ, 1998).



Fonte: Adaptado de (VASCONCELOS; ALBUQUERQUE; MARIZ, 1998).

Em 2015, BRANDÃO et al. (2015) propuseram um quase cristal que seguia a sequência de Octonacci. Para essa análise, foi usado a teoria da matriz de múltiplas camadas ópticas e foi observado bandas proibidas fotônicas bem definidas. A resposta da transmitância obtida nesse estudo pode ser observada na Figura 2.16.

Figura 2.16 – Transmitância para o quase cristal fotônico seguindo as sequência de Octonacci proposto por BRANDÃO et al. (2015).



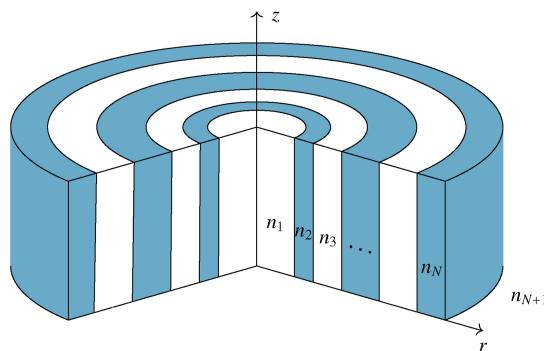
Fonte: Adaptado de (BRANDÃO et al., 2015)

Outros tipos de teste também foram realizados em demais trabalhos, como os efeitos da temperatura nos QCF unidimensionais (SINGH; PANDEY, 2016) e a existência de modos parecidos com polaritons plasmônicos Tamm (SHUKLA; DAS, 2018).

No trabalho de Marcos Segundo et al. (SEGUNDO; SILVA, 2018), o quase cristal, baseado na sequência de Fibonacci, é usado no regime SWG com o intuito de ampliar o modo do campo da onda para o fim de diminuir a possibilidade de espalhamento na interface núcleo/casca de um guia de onda com alto contraste de índice de refração.

Também é relevante mencionar o trabalho de Fernandes et al. (FERNANDES et al., 2021) que estuda quase cristais fotônicos cilíndricos, similares com aqueles já usados em fibras ópticas para aumentar a performance do guiamento. Na Figura 2.17 é possível observar como seria a estrutura desse QCF.

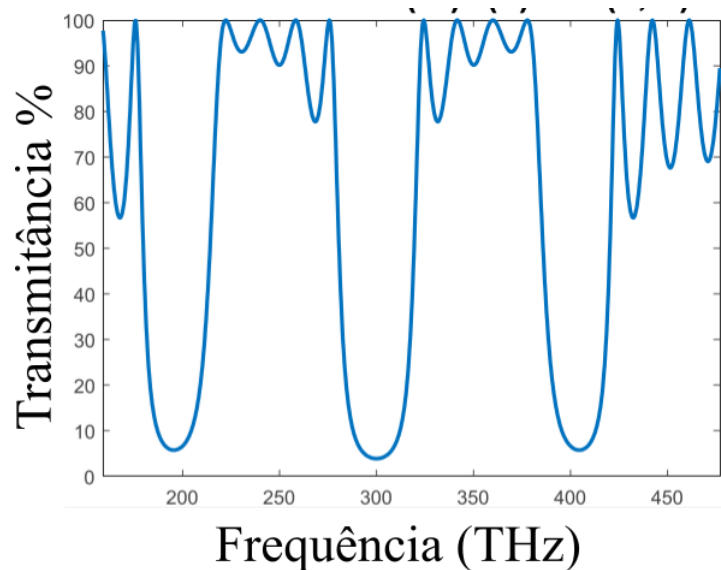
Figura 2.17 – Ilustração do QCF cilíndrico estudado por Fernandes.



Fonte: Adaptado de (FERNANDES et al., 2021)

Por fim, é também interessante citar o trabalho de ALI et al. (2022), em que o autor aplica a sequência Generalizada de Fibonacci na modelagem de um novo quase cristal fotônico. Nesse trabalho, os autores conseguem manipular a quantidade de bandas que se apresentam em um determinado espectro de frequência, sintonizando um dos parâmetros da sequência. Uma dessas respostas obtidas pode ser vista na Figura 2.18.

Figura 2.18 – Transmitância para o quase cristal fotônico seguindo as sequência Generalizada de Fibonacci proposto por ALI et al. (2022).



Fonte: Adaptado de (ALI et al., 2022)

Posteriormente, os estudos conduzidos por VASCONCELOS; ALBUQUERQUE; MARIZ (1998), BRANDÃO et al. (2015), e ALI et al. (2022) serão empregados como referência fundamental para a formulação dos guias de onda propostos nesta pesquisa.

2.3 Grade de Bragg em Fibra

A Fibra de Grade de Bragg (FGB) é obtida ao se alternar a índice de refração do núcleo da fibra óptica de forma periódica, obedecendo assim a Lei de Bragg (BRAGG; BRAGG, 1913).

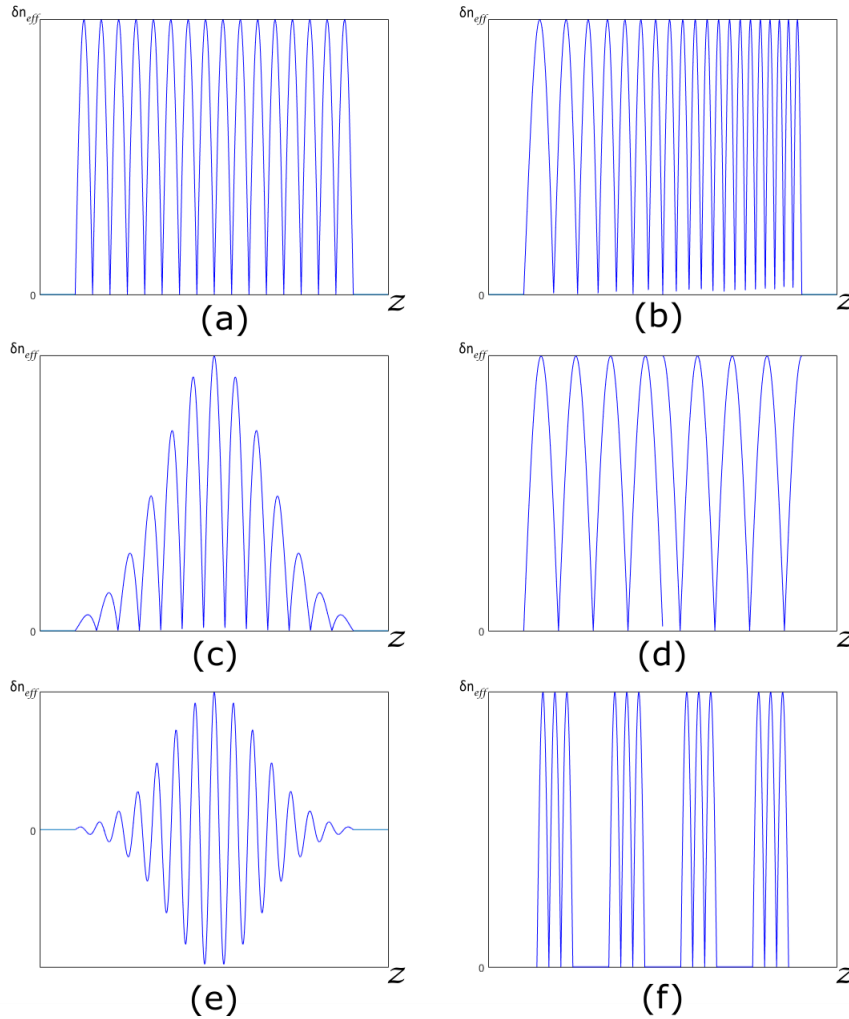
Devido à essas características, esse tipo de componente apresenta algumas funções, como reflexão e filtragem de ondas ópticas com certos comprimentos de onda, ao mesmo tempo que manifesta uma alta eficiência e baixas perdas (OTHONOS et al., 2006).

É importante frisar que as estruturas do FGB não são necessariamente únicas, podendo variar de acordo com o índice de refração ou período da grade (ERDOGAN, 1997). As mais comuns estruturas são:

- Uniforme com mudanças de índice positivo apenas
- Apodização gaussiana
- Apodização cosseno elevado
- Gorjeado
- Mudança de fase discreta
- Superestrutura

Na Figura 2.19 é possível observar como ocorrem as variações nesses tipos de fibras segmentadas.

Figura 2.19 – Perfil de índice de refração no núcleo para FGB: (a) Uniforme com mudanças de índice positivo apenas; (b) Gorjeado; (c) Apodização gaussiana; (d) Mudança de fase discreta; (e) Apodização cosseno elevado; e (f) Superestrutura.



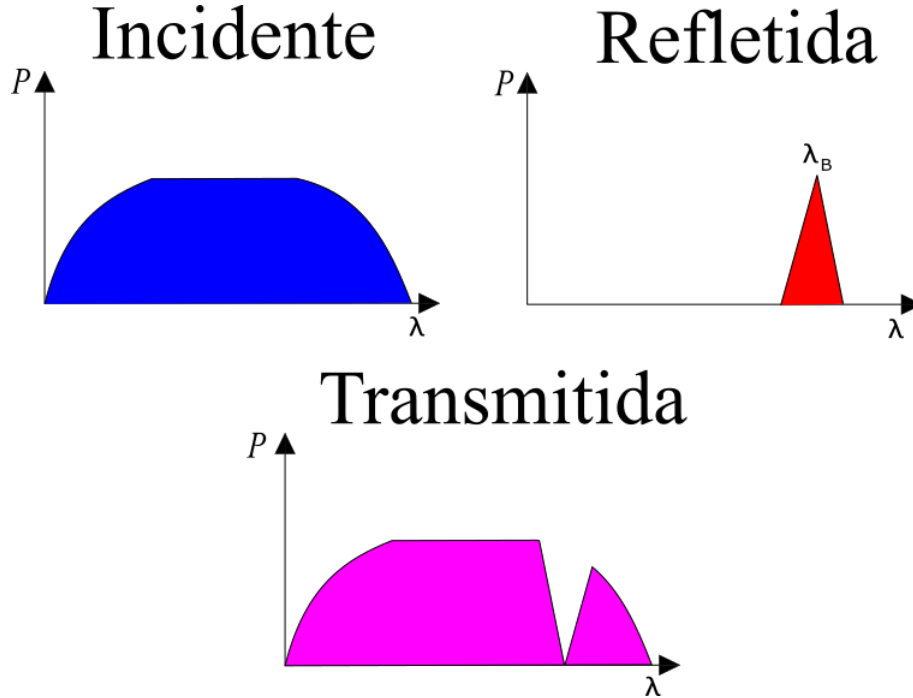
Fonte: Produzido pelo autor.

Dessas estruturas, a uniforme é a forma mais convencional (OTHONOS et al., 2006). Com esse tipo de arranjo óptico é possível chegar em reflexões de aproximadamente 100%. Dessa forma, as Fibras de Grade de Bragg, se tornam importantes ferramentas para serem usada na área de telecomunicações para refletir, filtrar ou dispersar luz (OTHONOS; KALLI, 1999).

O que ocorre é que a luz guiada pelo núcleo da fibra irá se espalhar a cada camada que encontrar. Se a frequência da luz não obedecer as condições de Bragg, a onda irá ficar cada vez mais fora de fase, até chegar ao ponto de se cancelar. Já as ondas que não possuírem o seu comprimento de onda de acordo com aquele que foi usado para projetar a grade, irá apresentar pouca reflexão devido à essa alternância de índice de refração (OTHONOS; KALLI, 1999).

Esse esquema pode ser visto na Figura 2.20, que mostra um exemplo da resposta espectral da onda que é incidida, transmitida e refletida.

Figura 2.20 – Exemplo de resposta espectral para a FGB.



Fonte: Produzido pelo autor.

Levando-se em conta a conservação de energia, sabe-se que a frequência da radiação incidida é a mesma da radiação refletida. Já a conservação de momento afirma que o vetor de onda da radiação espalhada k_f , menos o vetor de onda do feixe que está sendo incidido, k_i , é igual ao vetor de onda da grade K (OTHONOS et al., 2006).

Assim,

$$K = k_f - k_i \quad (2.7)$$

Considera-se que os vetores de onda difratado e incidido tem a mesma magnitude, porém possuem direções diferentes. Também, K possui uma magnitude de $2\pi/\Lambda$, no qual Λ é o período da grade.

Logo,

$$2 \left(\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B} \right) = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.8)$$

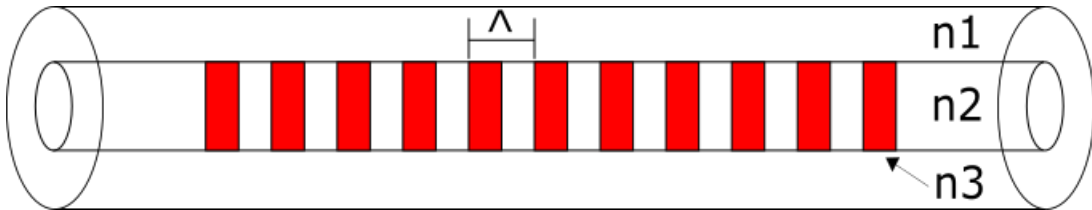
No qual λ_B é o comprimento de onda para qual foi projetada a grade de Bragg e n_{eff} é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra.

Rearranjando-se a igualdade da Equação 2.9, tem-se que:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.9)$$

Na Figura 2.21 é possível ver um exemplo de como ficaria um Fibras de Grade de Bragg com estrutura uniforme com mudanças de índice positivo apenas.

Figura 2.21 – Exemplo de Fibras de Grade de Bragg.



Fonte: Produzido pelo autor.

Ainda de acordo com (RUSSELL; ARCHAMBAULT; REEKIE, 1993), é possível calcular a largura de banda máxima de uma grade pela seguinte equação:

$$\Delta\lambda = \lambda_B S \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2} \quad (2.10)$$

No qual N é a quantidade de planos de grade, S é o valor que determina se a grade será fraca (com valor de $S \approx 0,5$) ou forte (com valor de $S \approx 1$), e n_0 é o índice de refração médio do núcleo da fibra.

Desde que se tornou possível a gravação de grades de Bragg em Fibras Ópticas, esses componentes vêm sendo usados em diferentes aplicações (HILL et al., 1978). Algumas dessas aplicações são como filtros, multiplexadores/demultiplexadores, sensores (ZHAO et al., 2021; WANG et al., 2021) e lasers (XIAO et al., 2012).

Capítulo 3

Metodologia e Proposta do Trabalho

O trabalho proposto nesta tese de doutorado se caracteriza predominantemente como uma abordagem quantitativa. Essa caracterização decorre da intenção de analisar dados numéricos provenientes de simulações de guias de onda segmentados utilizando sequências quase-periódicas. A ênfase na análise quantitativa se justifica pela necessidade de quantificar e avaliar numericamente o desempenho, comportamento e características dos guias de onda sob a influência dessas sequências quase-periódicas.

Para realizar essa análise, serão aplicadas inicialmente quatro sequências específicas, cada uma delas sendo cuidadosamente selecionada para explorar distintos aspectos do comportamento dos guias de onda segmentados. Essas sequências servirão como base para uma investigação aprofundada, proporcionando insights valiosos sobre o impacto das sequências quase-periódicas nos parâmetros desejados. As sequências estudadas foram:

- Generalizada de Fibonacci
- Thue-Morse
- Período Duplo
- Octonacci

A escolha dessas quatro sequências se destaca devido ao seu prévio estudo em quase-cristais, conforme documentado em ([VASCONCELOS; ALBUQUERQUE; MARIZ, 1998](#)) e ([BRANDÃO et al., 2015](#)). Essa base de conhecimento preexistente oferece uma sólida fundação para a exploração de aplicações em fibras ópticas e outros tipos de guias de onda.

O objetivo principal é efetuar alterações no núcleo de guias de onda ópticos, de maneira análoga ao que é praticado em fibras de grade de Bragg (FGB) e outras aplicações, mas com a implementação das sequências mencionadas anteriormente. Dessa forma, busca-se não apenas adaptar os quase cristais fotônicos nos guias de onda ópticos, mas também otimizar o desempenho desses dispositivos utilizando tais sequências. Exemplificações visuais das fibras com as novas grades podem ser apreciadas nas Figuras [3.1](#), [3.2](#), [3.3](#) e [3.4](#), proporcionando uma representação gráfica das modificações realizadas por meio dessa abordagem.

(MEF) para realizar seus cálculos computacionais, oferecendo uma abordagem eficaz para a análise detalhada desses sistemas.

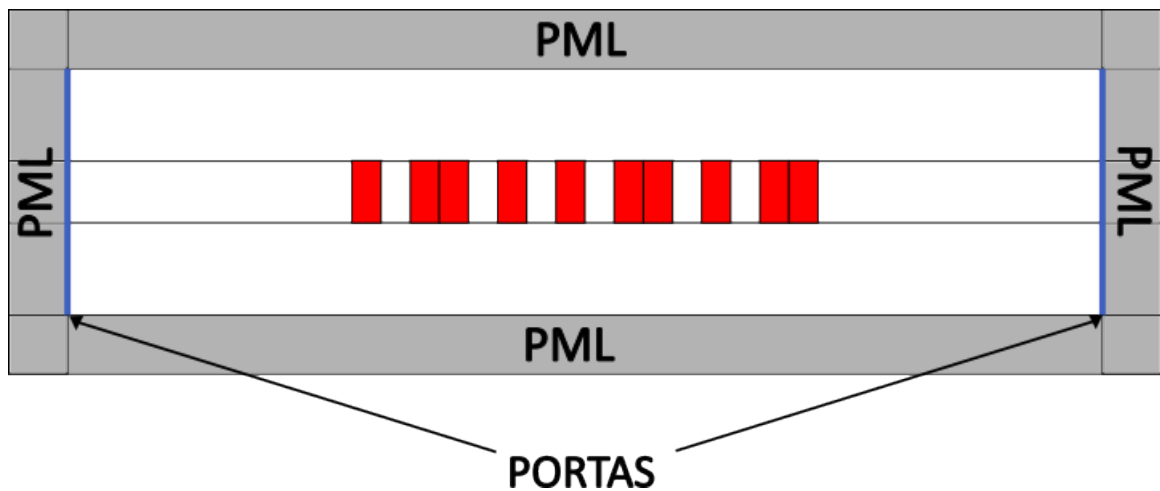
Com o intuito de otimizar os recursos computacionais, optou-se por realizar as simulações em 2D, uma escolha que proporciona resultados altamente precisos sem a necessidade de uma malha mais complexa. Além disso, foram incorporadas camadas perfeitamente casadas (PML - *Perfectly Matched Layers*) para melhorar a absorção de ondas nos limites do domínio de simulação.

Inicialmente, a modelagem da geometria do guia envolveu o projeto de um guia de onda simples com um núcleo contínuo, considerado como a geometria base. Simultaneamente, desenvolveu-se um *script* para gerar a geometria da grade, alinhado à sequência quase periódica de interesse para análise. Em uma etapa subsequente, essa grade foi integrada à geometria base, formando assim a estrutura completa do guia de onda segmentado.

Este processo de modelagem permitiu uma abordagem sistemática na incorporação das sequências quase periódicas nos guias de onda, proporcionando flexibilidade para explorar diferentes configurações e otimizar a geometria de acordo com as propriedades desejadas. Ao separar a geometria base da grade gerada pela sequência quase periódica, garantiu-se uma adaptação eficiente às variações estruturais introduzidas pela sequência, preservando, ao mesmo tempo, a integridade da geometria original do guia de onda.

A Física (*Physics*) selecionada para as simulações foi a *Electromagnetic Waves, Frequency Domain*. Esta escolha foi motivada pela capacidade desse método de permitir a observação tanto dos sinais transmitidos quanto a análise das múltiplas reflexões entre as camadas de maneira bidirecional. Para facilitar a análise, foram adicionadas duas portas numéricas ao modelo: uma na entrada excitada e outra na saída sem excitação. Uma representação visual do modelo adotado para essas simulações pode ser apreciada na Figura 3.5, proporcionando uma visão gráfica do ambiente de simulação. Este procedimento robusto de modelagem e simulação proporciona uma base sólida para a análise detalhada do comportamento dos guias de onda segmentados em resposta às sequências quase-periódicas aplicadas.

Figura 3.5 – Representação gráfica do modelo adotado para as simulações.



Fonte: Produzido pelo autor.

Para a malha desenvolvida, foi adotada o tipo de elemento triangular linear, com exceção das áreas da PML que foi adotado um tipo de elemento retangular. Os parâmetros adotados para a malha para a casca foi o de Extremamente Fino. Já o restante podem ser resumidos na Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Parâmetros de malha do núcleo e grade.

Parâmetro	Medida
Tamanho máximo do elemento	0,1337 μm
Tamanho mínimo do elemento	0,0401 μm
Máxima taxa de crescimento do elemento	1,3
Fator de Curvatura (μm)	0,3
Resolução de regiões estreitas (μm)	1

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 2 – Parâmetros de malha das portas.

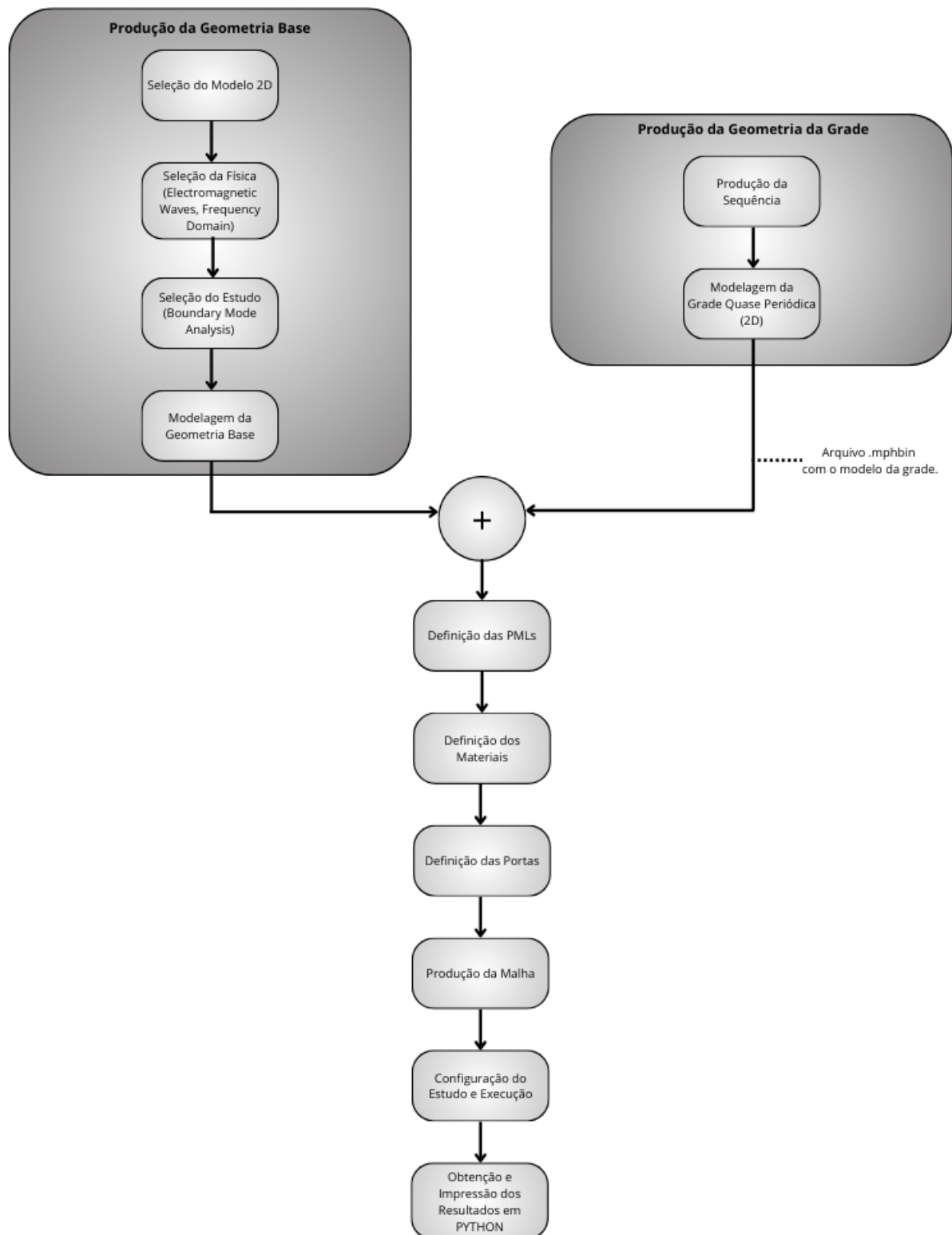
Parâmetro	Medida
Tamanho máximo do elemento	0,096880 μm
Tamanho mínimo do elemento	0,0029060 μm
Máxima taxa de crescimento do elemento	1,3
Fator de Curvatura (μm)	0,3
Resolução de regiões estreitas (μm)	1

Fonte: Produzido pelo autor.

Como parte do estudo, foram incorporadas duas análises de modo de limites (*Boundary Mode Analysis*), uma para cada porta, visando uma compreensão abrangente do comportamento do guia de onda segmentado. Além disso, foi realizado um estudo de análise no domínio da frequência, permitindo uma investigação detalhada das respostas espectrais do sistema.

Em uma etapa subsequente, foram conduzidos testes para avaliar o desempenho desses modelos de guia de onda desenvolvidos quando empregados como filtros e sensores. Essa avaliação foi realizada à luz de estudos anteriores, como (NI et al., 2017), (KAPLAN et al., 2018), e (LIANG et al., 2005), que forneceram referências importantes para a análise de filtros e sensores baseados em guias de onda segmentados. Um resumo dessas etapas pode ser visto no diagrama de blocos apresentado na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Diagrama de blocos da análise do sistema proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

A determinação das larguras das camadas A e B foi realizada utilizando a Equação 3.1, uma formulação embasada nos trabalhos de Vasconcelos et al. (VASCONCELOS; ALBUQUERQUE; MARIZ, 1998) e Brandão et al. (BRANDÃO et al., 2015). Essa abordagem

na determinação das larguras é essencial para garantir a consistência e a validade dos modelos, alinhando-se com as melhores práticas estabelecidas pela pesquisa anterior na área. Essa combinação de análises modais, estudos espectrais e testes práticos estabelece uma base abrangente para a avaliação e otimização contínua dos guias de onda segmentados propostos.

$$d_J = \frac{\lambda_{QCF}}{4n_J} \quad (3.1)$$

No qual $J = A$ ou B e λ_{QCF} é o comprimento de onda central da banda proibida fotônica da grade proposta.

A fim de investigar o comportamento destas sequências de segmentação no núcleo de guias de onda, foram feitas diversas análises paramétricas. Cada um desses estudos ofereceu uma perspectiva valiosa sobre como a sequência impacta a segmentação no contexto específico dos guias de onda. Cada caso de estudo foi meticulosamente conduzido, considerando uma variedade de parâmetros e condições, proporcionando uma compreensão abrangente do desempenho da sequência de segmentação em diferentes cenários no âmbito dos guias de onda ópticos. Essa abordagem multifacetada permitiu uma análise profunda e abrangente do comportamento das sequências em relação à segmentação do núcleo de guias de onda, enriquecendo assim o entendimento do seu potencial aplicativo e otimização em contextos específicos.

Além das análises realizadas no COMSOL[®], a interpretação e manipulação dos dados resultantes foram facilitadas e aprimoradas por meio do emprego da linguagem de programação Python. Através de scripts e bibliotecas específicas em Python, foi possível automatizar processos e visualizar de maneira mais dinâmica e interpretativa as informações extraídas das simulações dos guias de onda segmentados. Dessa forma, a combinação do COMSOL[®] e Python ofereceu uma abordagem integrada e eficiente para explorar, interpretar e comunicar os resultados obtidos ao longo deste estudo.

Capítulo 4

Fibra Óptica com Núcleo Segmentado Obedecendo a Sequência Generalizada de Fibonacci

4.1 Sequência Generalizada de Fibonacci

A sequência de Fibonacci é um sistema quase periódico entre dois blocos iniciais (A e B) que a cada iteração obedece a seguinte regra (TRABELSI et al., 2013):

$$S_k = S_{k-1}S_{k-2} \quad (4.1)$$

No qual $S_0 = A$, $S_1 = B$ e $k > 1$. Dessa forma, a sequência seria a seguinte:

$$S_0 = [A], S_1 = [B], S_2 = [BA], S_3 = [BAB], \text{ etc.} \quad (4.2)$$

Essa sequência já foi amplamente estudada na área da fotônica, sendo exemplos desses estudos os trabalhos de VASCONCELOS; ALBUQUERQUE; MARIZ (1998), SEGUNDO; SILVA (2018) e SEGUNDO; SILVA (2023).

Já a sequência generalizada de Fibonacci é uma classe desse encadeamento quase periódico (TRABELSI et al., 2013). Ela adiciona à equação os índices m e n , de forma que ela passa a ser:

$$S_k = S_{k-1}^m S_{k-2}^n \quad (4.3)$$

Sendo $m, n \geq 1$. Um exemplo, para $m = 2$ e $n = 1$, teriam-se as seguintes sequências:

$$S_2 = [BBA], S_3 = [BBABBAB], S_4 = [BBABBABBBABBABBBBA], \text{ etc.} \quad (4.4)$$

Para estudar o comportamento dessa sequência de segmentação no núcleo de guias de onda, foram conduzidos os seguintes “Estudos de Caso”:

Tabela 3 – Modelos analisados usando a sequência generalizada de fibonacci.

	Estudo de Caso 1	Estudo de Caso 2
Material 1	SiO_2	SiO_2
Material 2	SiO_2 dopado	SiO_2 dopado
Material 3	TiO_2	Si
Tipo de Guia	Circular	Circular

Fonte: Produzido pelo autor.

4.2 Estudo de Caso 1

4.2.1 Parâmetros da Simulação

O primeiro estudo de caso foi baseado nos trabalhos de [VASCONCELOS; ALBUQUERQUE; MARIZ \(1998\)](#) e [ALI et al. \(2022\)](#), em que os autores consideram o dióxido de silício dopado e o dióxido de titânio para as segmentações. Para a casca do guia de onda foi considerado o dióxido de silício com índice de refração comum em fibras ópticas. Alguns dados do guia de onda segmentado podem ser vistos na Tabela 4

Tabela 4 – Parâmetros de simulação do Estudo de Caso 1

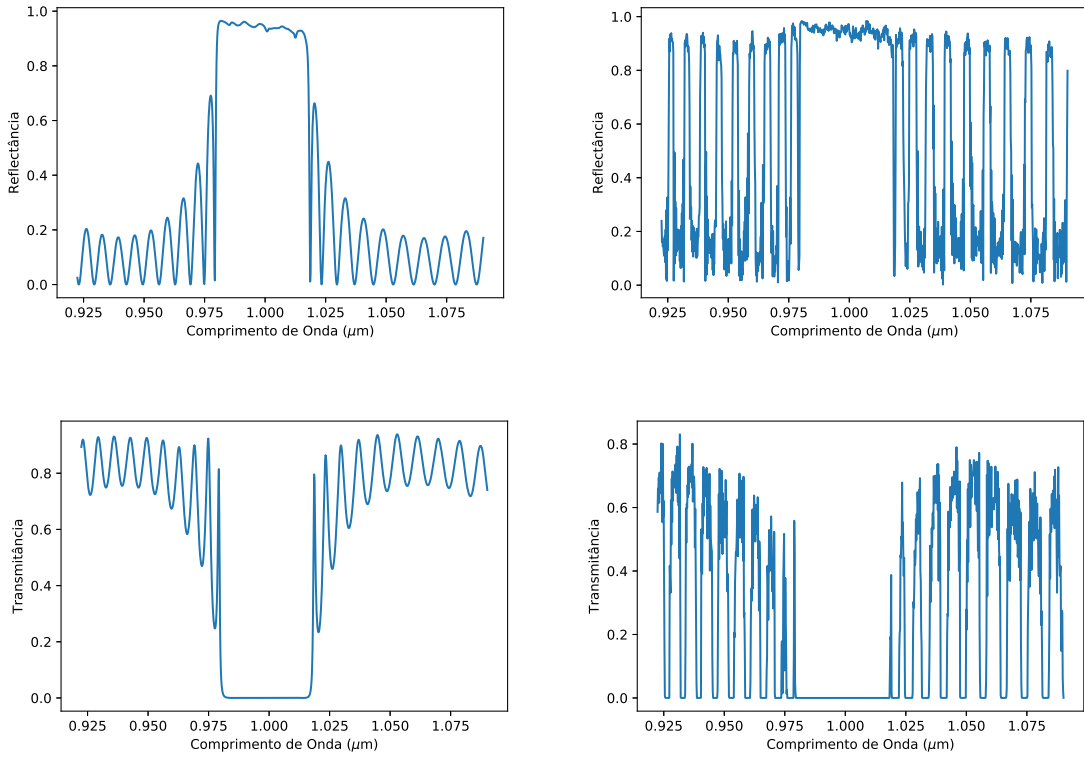
Parâmetro	Medida
Material 1	$(n = 1,444024)$
Material 2	$(n = 1,45)$
Material 3	$(n = 2,3)$
Largura A (μm)	0,17253266
Largura B (μm)	0,10869565
Diâmetro da Casca (μm)	125
Diâmetro do Núcleo (μm)	8,2
λ_{QCF} (μm)	1,0

Fonte: Produzido pelo autor.

4.2.2 Resultados

Primeiro, pode-se analisar os guias com a segmentação do núcleo seguindo a sequência generalizada de Fibonacci, observando-se nas reflectâncias e transmitâncias apresentadas na Figura 4.1 que a resposta para $k = 4$ possui maiores oscilações para comprimentos de onda diferentes da banda central do que para o caso de $k = 3$.

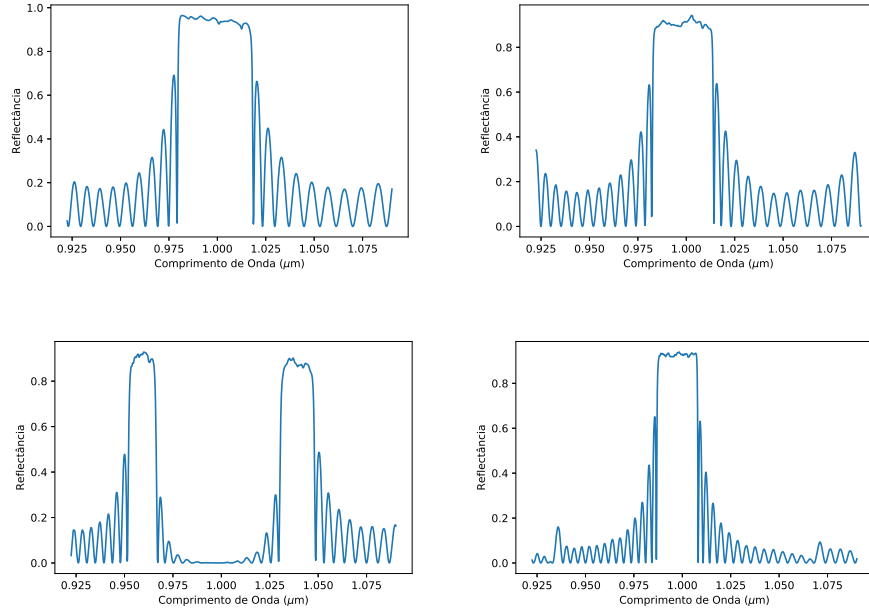
Figura 4.1 – Reflectância com $k = 3$ para $m = 15$ e $n = 1$ (superior esquerdo) e $k = 4$ para $m = 15$ e $n = 1$ (superior direito), e transmitância com $k = 3$ para $m = 15$ e $n = 1$ (inferior esquerdo) e $k = 4$ para $m = 15$ e $n = 1$ (inferior direito) para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

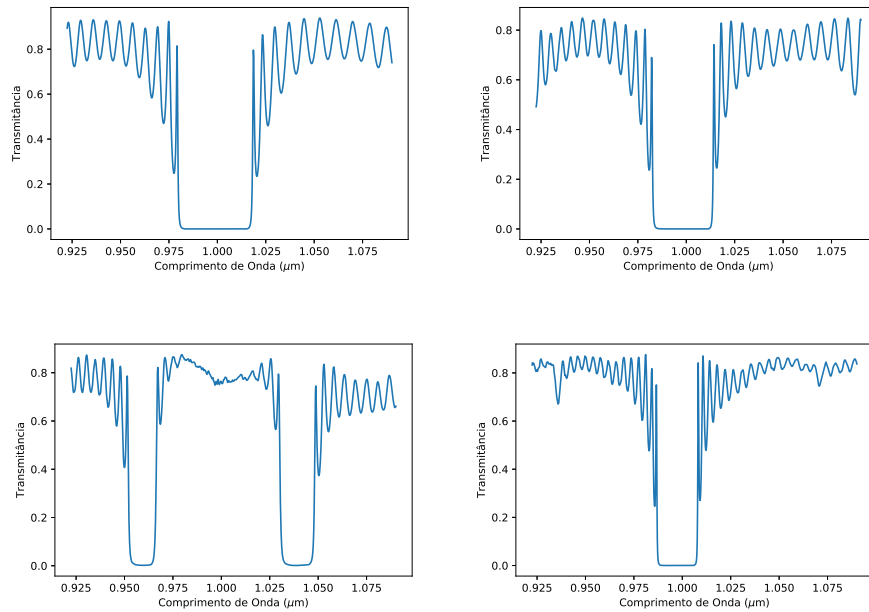
Observa-se que essas oscilações podem ser diminuídas aumentando os valores de n como pode ser visto nas Figuras 4.2 e 4.3 para $k = 3$, e nas Figuras 4.4 e 4.5 para $k = 4$. Esse é um efeito que não foi inicialmente estudado por [SEGUNDO; SILVA \(2023\)](#).

Figura 4.2 – Reflectância com $k = 3$ para $m = 15$ e $n = 1$ (superior esquerdo), $m = 15$ e $n = 5$ (superior direito), $m = 15$ e $n = 10$ (inferior esquerdo) e $m = 15$ e $n = 15$ (inferior direito) para o guia de onda proposto.



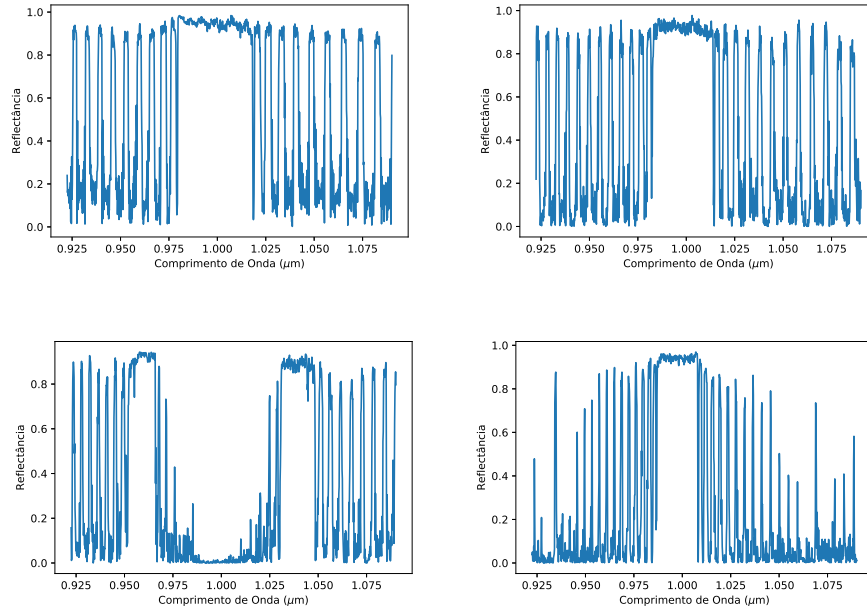
Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 4.3 – Transmitância com $k = 3$ para $m = 15$ e $n = 1$ (superior esquerdo), $m = 15$ e $n = 5$ (superior direito), $m = 15$ e $n = 10$ (inferior esquerdo) e $m = 15$ e $n = 15$ (inferior direito) para o guia de onda proposto.



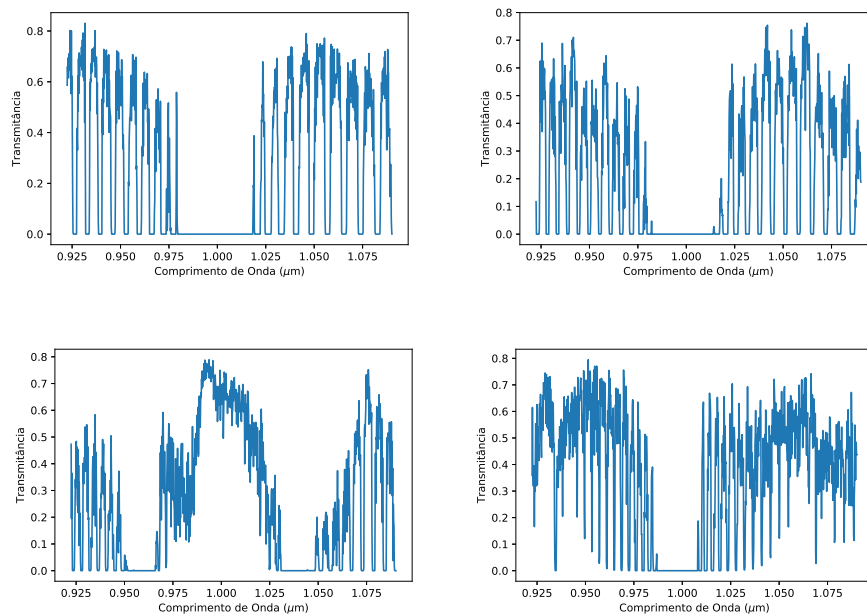
Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 4.4 – Reflectância com $k = 4$ para $m = 15$ e $n = 1$ (superior esquerdo), $m = 15$ e $n = 5$ (superior direito), $m = 15$ e $n = 10$ (inferior esquerdo) e $m = 15$ e $n = 15$ (inferior direito) para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 4.5 – Transmitância com $k = 4$ para $m = 15$ e $n = 1$ (superior esquerdo), $m = 15$ e $n = 5$ (superior direito), $m = 15$ e $n = 10$ (inferior esquerdo) e $m = 15$ e $n = 15$ (inferior direito) para o guia de onda proposto.

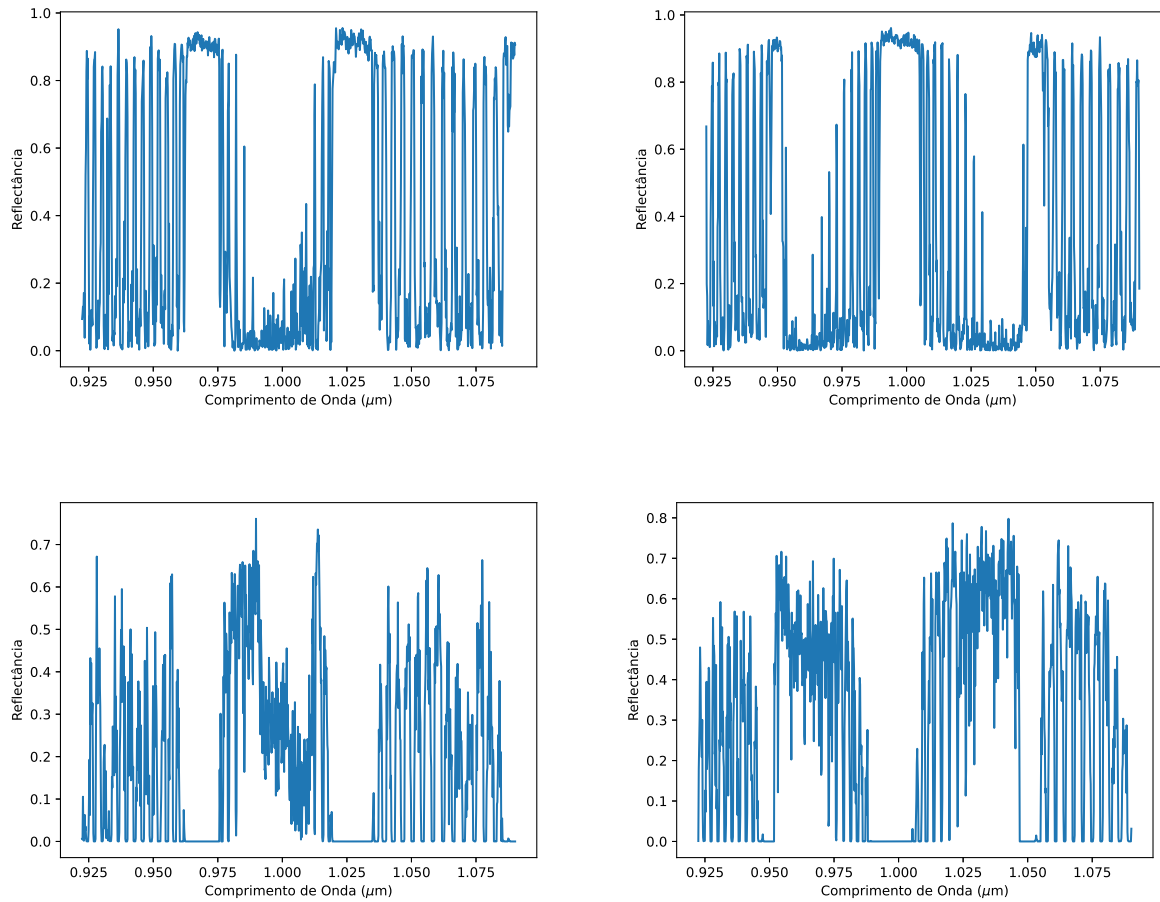


Fonte: Produzido pelo autor.

É evidente que, à medida que o valor de n aumenta, torna-se viável efetuar um ajuste mais preciso na largura da banda central. Isso é claramente ilustrado na Figura 4.6, onde esse

padrão persiste mesmo quando n supera m . No entanto, é importante notar que, nesse ponto, já se manifesta uma redução na capacidade de transmitir sinais.

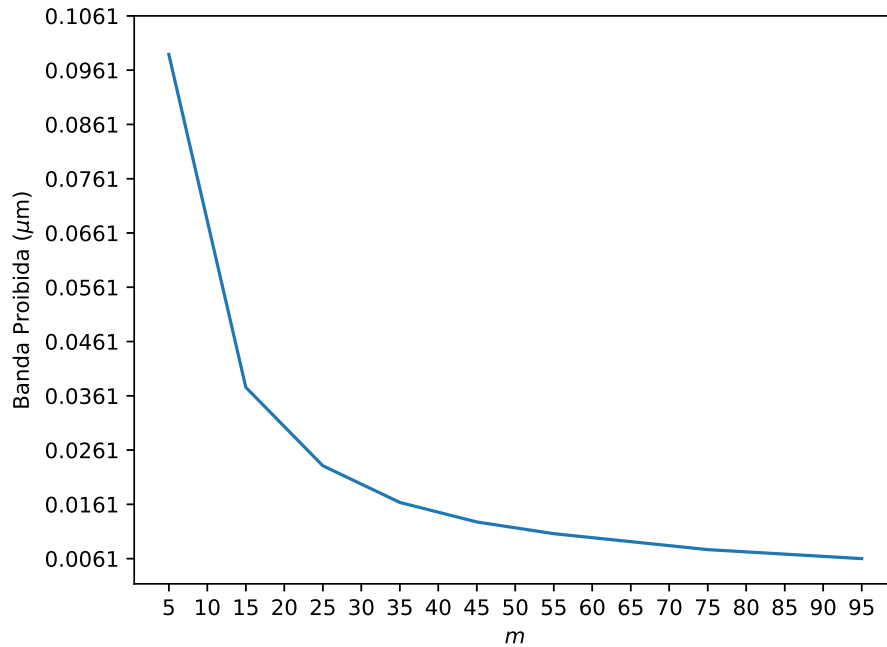
Figura 4.6 – Reflectância com $k = 4$ para $m = 15$ e $n = 20$ (superior esquerdo) e $m = 15$ e $n = 25$ (superior direito), e transmitância com $k = 4$ para $m = 15$ e $n = 20$ (inferior esquerdo) e $m = 15$ e $n = 25$ (inferior direito) para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Uma outra análise que pode ser feita é como a largura de banda central diminui com o aumento de m . É possível observar que ao contrário do que afirma (ALI et al., 2022), a quantidade de bandas proibidas fotônicas (PBGs) não se comporta como uma equação do 1º grau. A Figura 4.7 mostra que as bandas proibidas diminuem cada vez menos com o aumento de m .

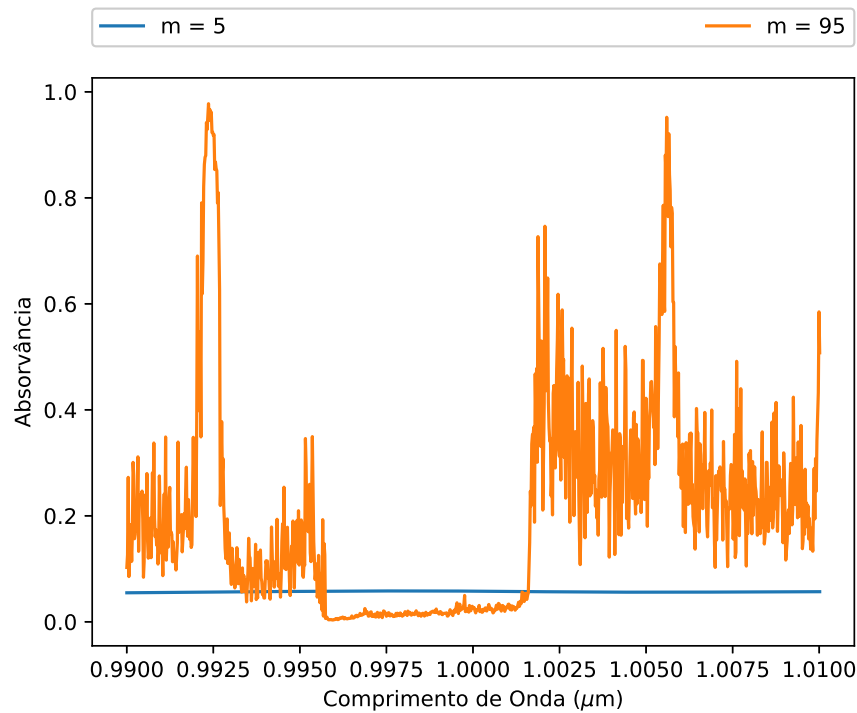
Figura 4.7 – Valores da banda proibida central de acordo com o valor de m , com $k = 3$ e $n = 1$, para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Outra resposta que se obtém com essa análise é que com o aumento de m , também irá aumentar a absorvância para alguns comprimentos de onda. Isso é possível se observar com a comparação apresentada na Figura 4.8, no qual ocorre um aumento significativo na absorvância em comprimentos de onda que não estão localizados na banda central, principalmente nos que variam de $0,992161328381069\mu m$ à $0,9926811250690305\mu m$ e de $1,0054761204650053\mu m$ à $1,0057959953499047\mu m$.

Figura 4.8 – Absorvâncias com $k = 3$ para $m = 5$ e $n = 1$ (linha azul) e $m = 95$ e $n = 1$ (linha laranja) para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

4.3 Estudo de Caso 2

4.3.1 Parâmetros da Simulação

Para o Estudo de Caso 2, usou-se Dióxido de silício dopado e silício como materiais formadores da grade proposta. Para se obter os valores dos índices de refração, foi usada a equação de Sellmeier com os dados obtidos em (FREY; LEVITON; MADISON, 2006) e (LEVITON; FREY, 2006).

Os parâmetros para esse estudo de caso podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros de simulação do Estudo de Caso 2

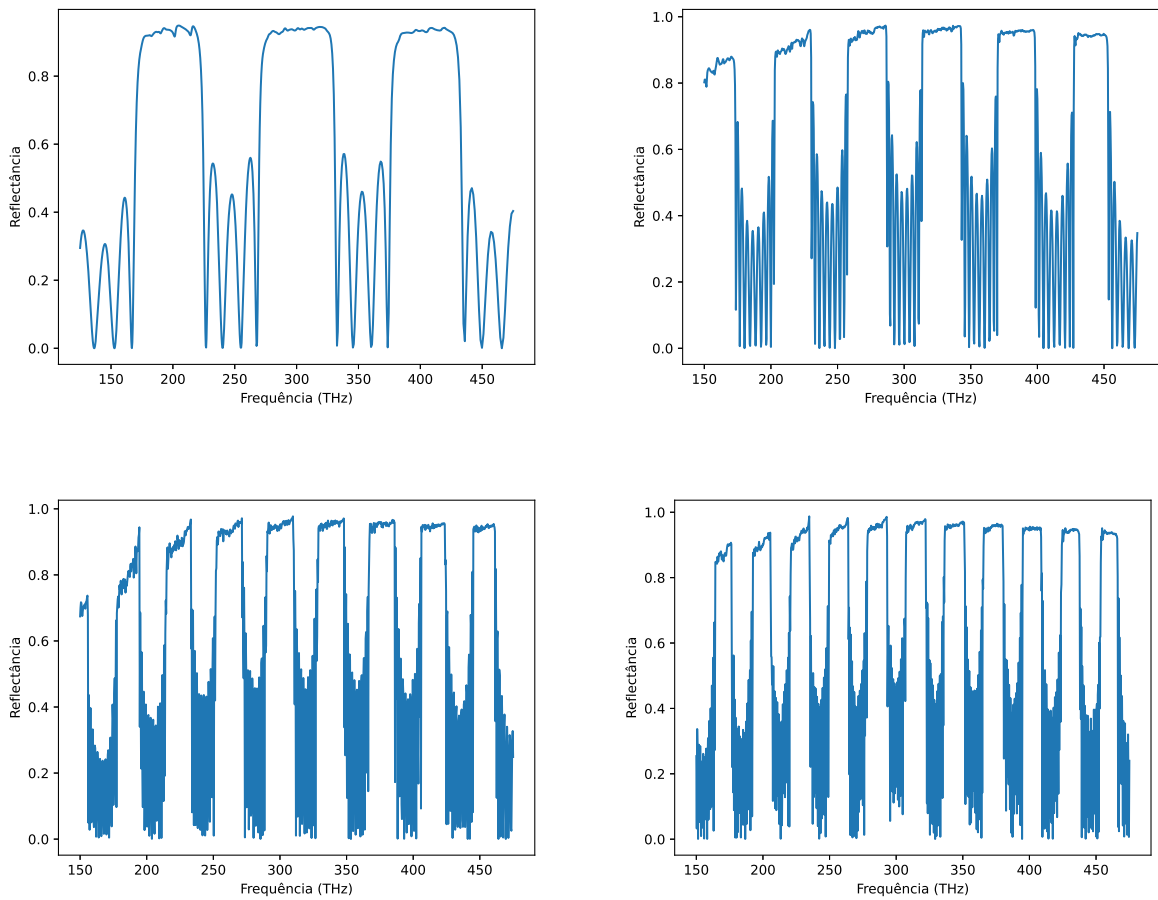
Parâmetro	Medida
Material 1	($n = 1,4508213183$)
Material 2	($n = 1,4560213183$)
Material 3	($n = 3,5727714123$)
Largura A (μm)	0,1717007827
Largura B (μm)	0,0699736902
Diâmetro da Casca (μm)	125
Diâmetro do Núcleo (μm)	8,2
λ_{QCF} (μm)	1,0

Fonte: Produzido pelo autor.

4.3.2 Resultados

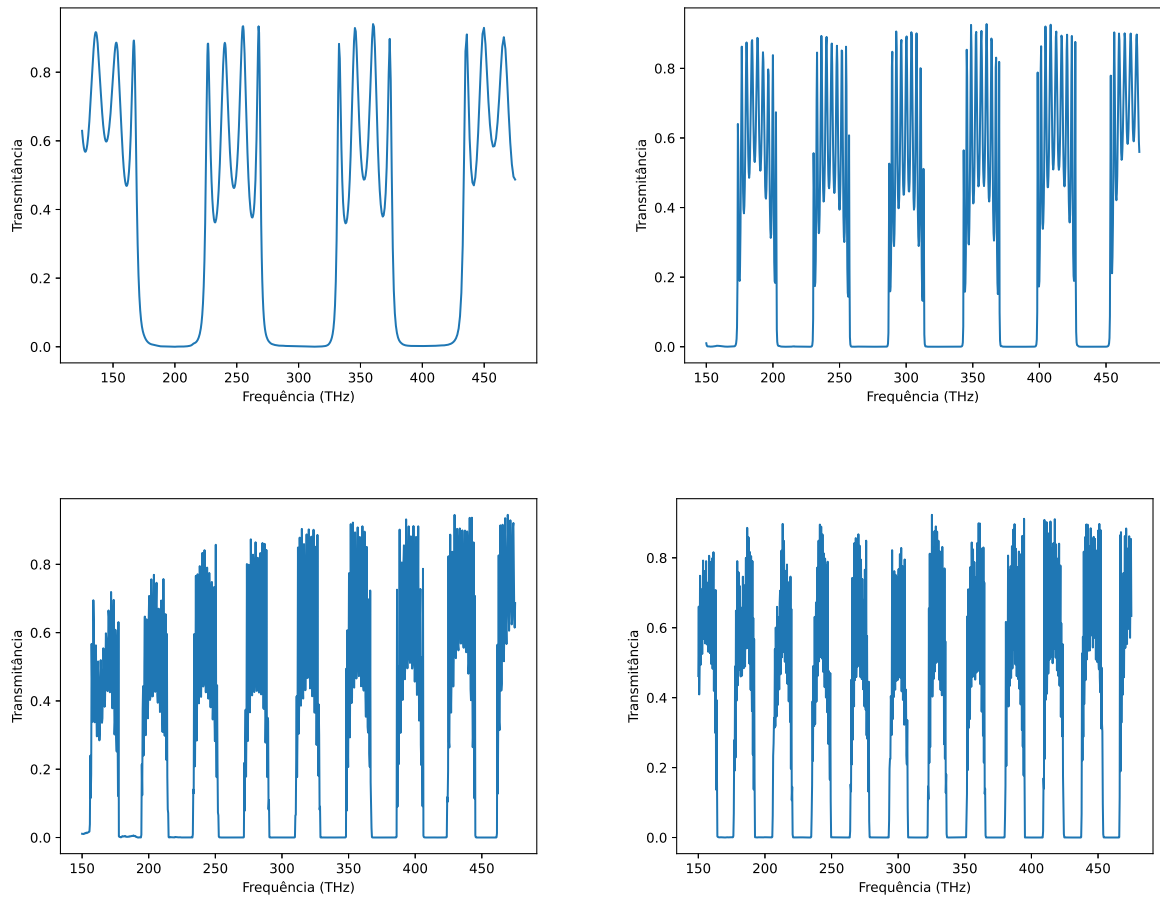
Inicialmente foram realizadas simulações para $k = 3$ e $n = 1$, com m igual à 5, 10, 15 e 20, similar ao que foi feito no trabalho de [ALI et al. \(2022\)](#). É possível observar nas Figuras 4.9 e 4.10, que a medida que se aumenta os valores de m , aumenta-se também a absorvância para frequências menores.

Figura 4.9 – Reflectância com $k = 3$ para $m = 5$ e $n = 1$ (superior esquerdo), $m = 10$ e $n = 1$ (superior direito), $m = 15$ e $n = 1$ (inferior esquerdo) e $m = 20$ e $n = 1$ (inferior direito) para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

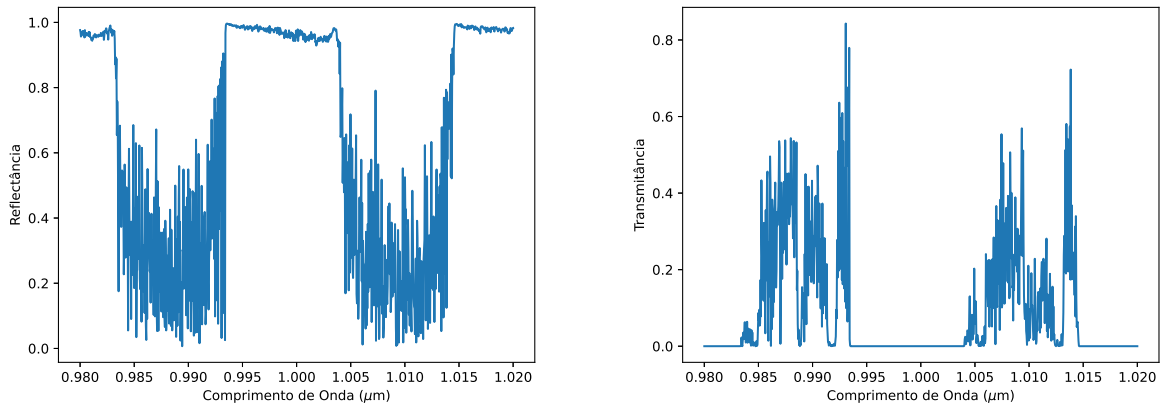
Figura 4.10 – Transmitância com $k = 3$ para $m = 5$ e $n = 1$ (superior esquerdo), $m = 10$ e $n = 1$ (superior direito), $m = 15$ e $n = 1$ (inferior esquerdo) e $m = 20$ e $n = 1$ (inferior direito) para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Mesmo assim, é possível ver que esses guias de onda apresentam respostas similares aos guias de onda do Estudo de Caso 1. A grande diferença se mostra mais para valores de m bem maiores, como no caso de $m = 95$, como mostrado na Figura 4.11.

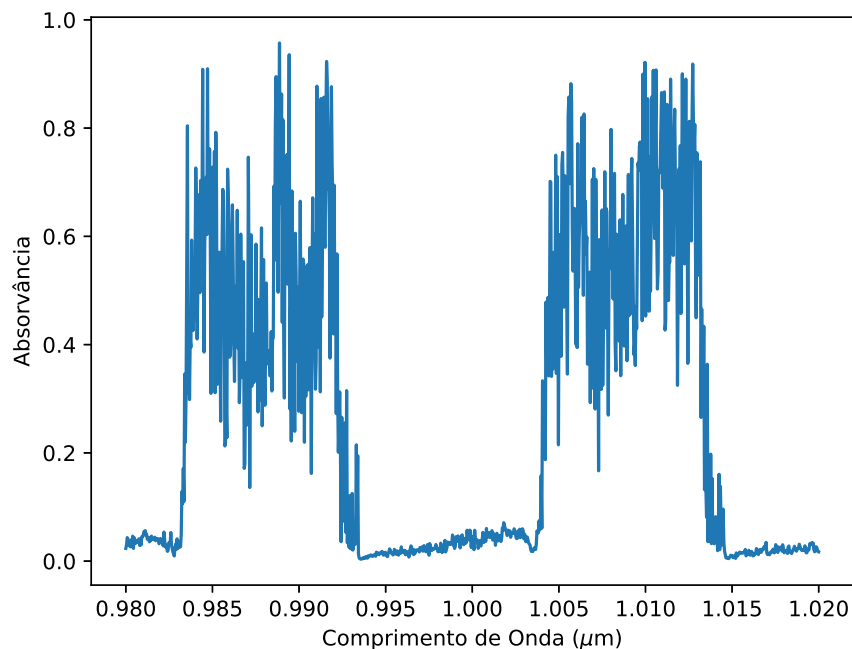
Figura 4.11 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 3$, $m = 95$ e $n = 1$ para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Para esse caso, a absorvância aumenta em muito para valores de comprimento de onda que não se concentram nas bandas proibidas. Esse comportamento é facilmente observado na Figura 4.12.

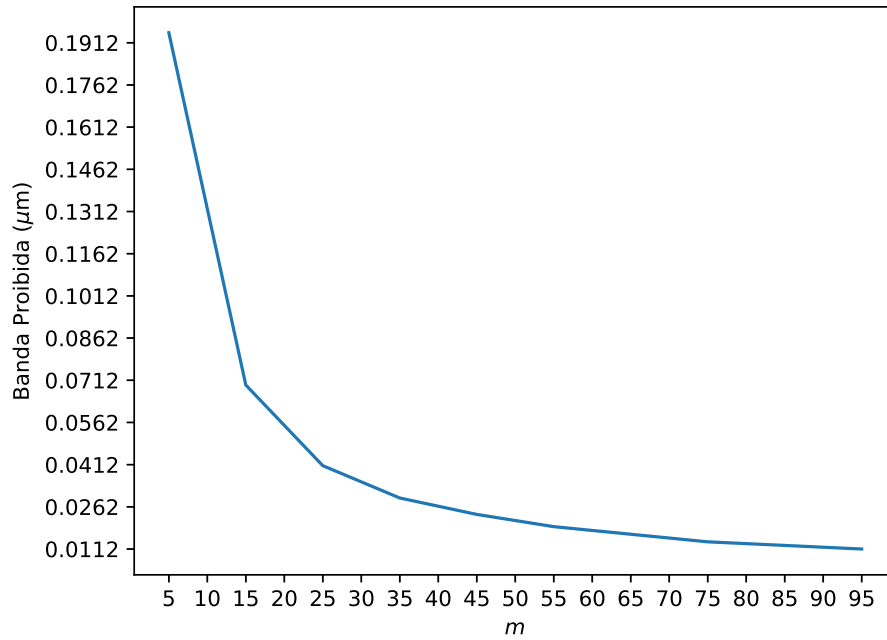
Figura 4.12 – Absorvância com $k = 3$, $m = 95$ e $n = 1$ para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Similar ao que aconteceu no estudo de caso anterior, os valores de banda proibida se comportam como uma função exponencial decrescente a medida que o valor de m aumenta. É possível observar esse comportamento por meio do gráfico da Figura 4.13.

Figura 4.13 – Valores da banda proibida central de acordo com o valor de m , com $k = 3$ e $n = 1$, para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Capítulo 5

Fibra Óptica com Núcleo Segmentado Obedecendo a Sequência Thue Morse

5.1 Sequência Thue Morse

A sequência de Thue-Morse é um sistema quase periódico que se origina a partir de dois blocos iniciais, denominados A e B. À cada iteração, essa sequência segue rigorosamente as regras especificadas (VASCONCELOS; ALBUQUERQUE; MARIZ, 1998):

$$S_k = S_{k-1}S_{k-1}^+ \quad (5.1)$$

$$S_k^+ = S_{k-1}^+S_{k-1} \quad (5.2)$$

Para isso, precisa-se que $S_0 = A$, $S_0^+ = B$ e $k \geq 1$. Dessa forma, a sequência seria a seguinte:

$$S_0 = [A], S_1 = [AB], S_2 = [ABBA], S_3 = [ABBABAAB], \text{ etc.} \quad (5.3)$$

O comportamento dessa sequência em óptica para cristais unidimensionais já foi estudada inicialmente no trabalho de VASCONCELOS; ALBUQUERQUE; MARIZ (1998).

Para esse tipo de sequência, serão apresentados dois “Estudos de Caso”, com o intuito de analisar como se comportariam segmentações do seu núcleo seguindo esse padrão. Os modelos analisados foram resumidos inicialmente na Tabela 6.

5.2 Estudo de Caso 3

5.2.1 Parâmetros da Simulação

Para o Estudo de Caso 3 foram considerados parâmetros similares aos adotados por VASCONCELOS; ALBUQUERQUE; MARIZ (1998), em que a sequência Thue Morse é adotada

Tabela 6 – Modelos a serem analisados usando a sequência Thue Morse.

	Estudo de Caso 3	Estudo de Caso 4
Material 1	SiO_2	SiO_2
Material 2	SiO_2 dopado	SiO_2 dopado
Material 3	TiO_2	Si
Tipo de Guia	Circular	Circular

Fonte: Produzido pelo autor.

em uma alternância entre dióxido de silício (no caso desse trabalho ele será dopado) e dióxido de titânio. Para a casca será usado dióxido de silício não dopado.

Tabela 7 – Parâmetros de simulação do Estudo de Caso 3

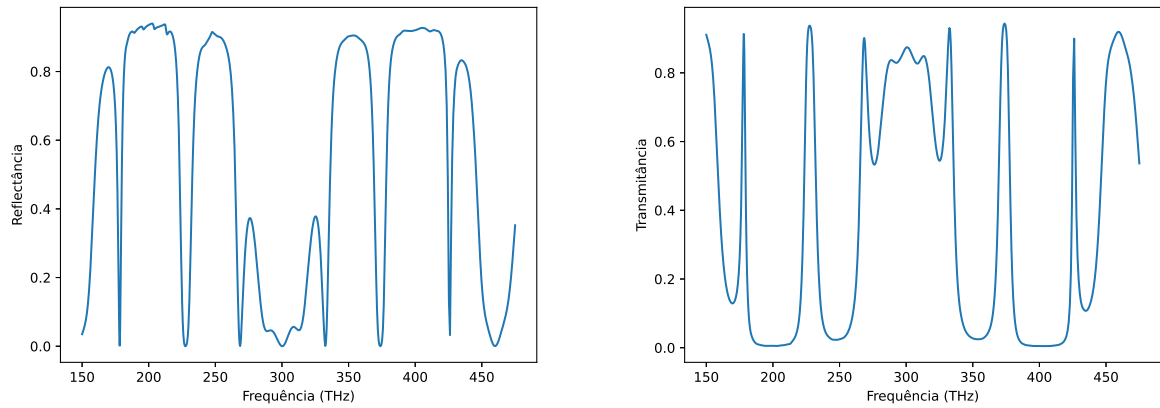
Parâmetro	Medida
Material 1	$(n = 1,444024)$
Material 2	$(n = 1,449001)$
Material 3	$(n = 2,3)$
Largura A (μm)	0,17253266
Largura B (μm)	0,10869565
Diâmetro da Casca (μm)	125
Diâmetro do Núcleo (μm)	8,2
λ_{QCF} (μm)	1,0

Fonte: Produzido pelo autor.

5.2.2 Resultados

A Figura 5.1 apresenta a resposta da reflectância e transmitância para o guia de onda proposto considerando $k = 5$. Essa resposta apresenta uma grande similaridade aos resultados expostos por VASCONCELOS; ALBUQUERQUE; MARIZ (1998). A diferença mais proeminente é a absorvância apresentada para esse estudo do cristal sendo aplicado em um guia de onda.

Figura 5.1 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 5$ para o guia de onda proposto.

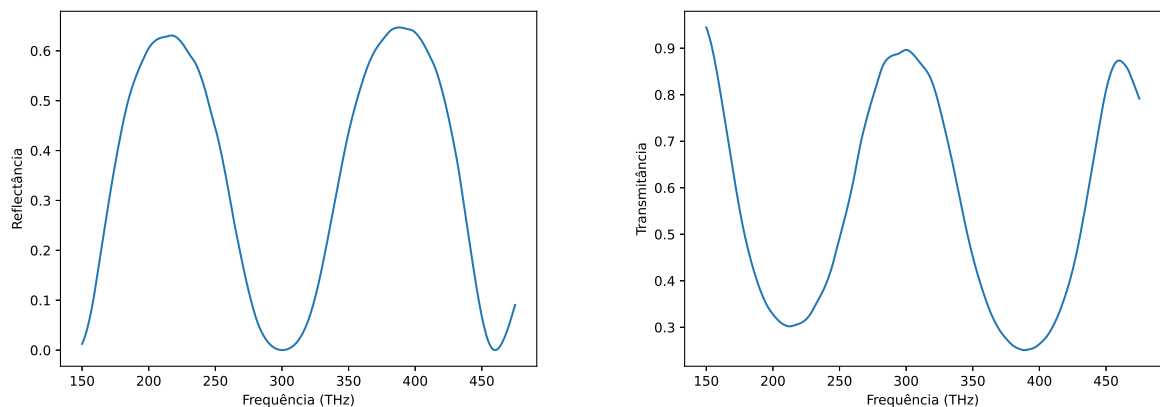


Fonte: Produzido pelo autor.

É interessante salientar para esse caso que, diferente dos outros tipos de segmentação, a banda central é de um passa faixa.

Ao reduzir o valor de k para um patamar inferior, embora as bandas de passagem mantenham uma boa transmitância, as bandas proibidas experimentam significativa redução nos seus valores de reflectância. Este fenômeno é evidenciado na Figura 5.2, na qual foi adotado $k = 3$.

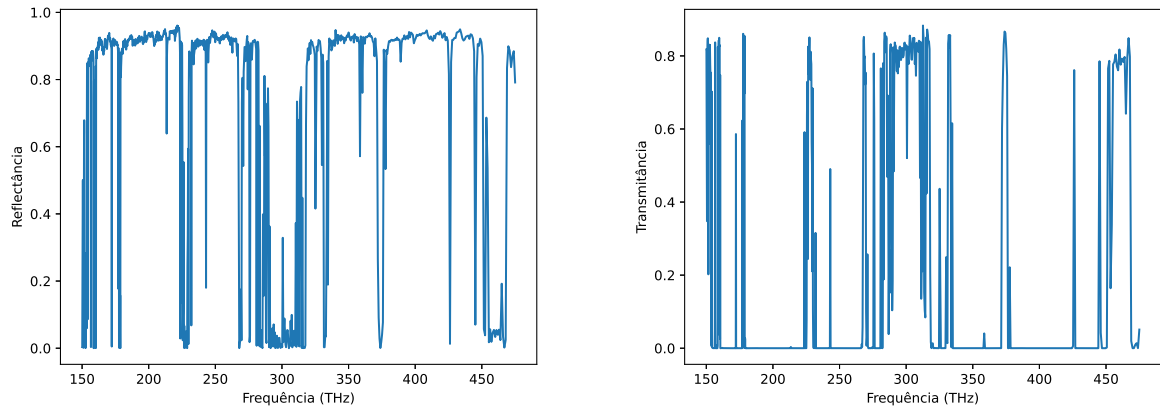
Figura 5.2 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 3$ para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Já quando se aumenta o valor de k , também aumenta-se a quantidade de oscilações nas respostas de reflectância e transmitância, diminuindo muito a definição de algumas bandas. É possível observar esse comportamento com mais clareza na Figura 5.3 em que foi considerada uma segmentação com $k = 10$.

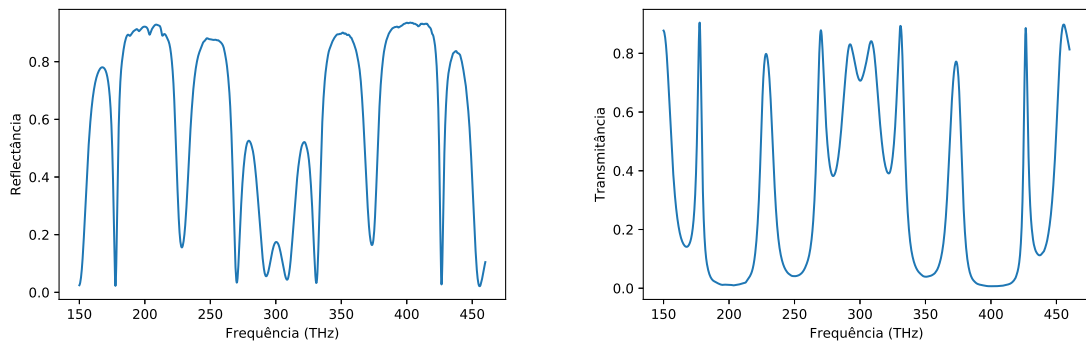
Figura 5.3 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 10$ para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Um experimento também possível de ser realizado é a inversão dos materiais dos blocos A e B. A Figura 5.4 mostra que para esse caso as respostas de reflectância e transmitância são bem similares às aquelas apresentadas na Figura 5.1. Isso provavelmente se deve ao fato de a razão entre o número de blocos de construção A e o número de blocos de construção B ser constante e igual à 1 (VASCONCELOS; ALBUQUERQUE; MARIZ, 1998).

Figura 5.4 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 5$, e os materiais de A e B invertidos, para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

5.3 Estudo de Caso 4

5.3.1 Parâmetros da Simulação

Para esse estudo de caso, novamente foram considerados os valores de índice de refração do dióxido de silício e do silício obtidos a partir dos estudos apresentados nos trabalhos de FREY; LEVITON; MADISON (2006) e LEVITON; FREY (2006) para uma temperatura de $295K$.

Tabela 8 – Parâmetros de simulação do Estudo de Caso 4

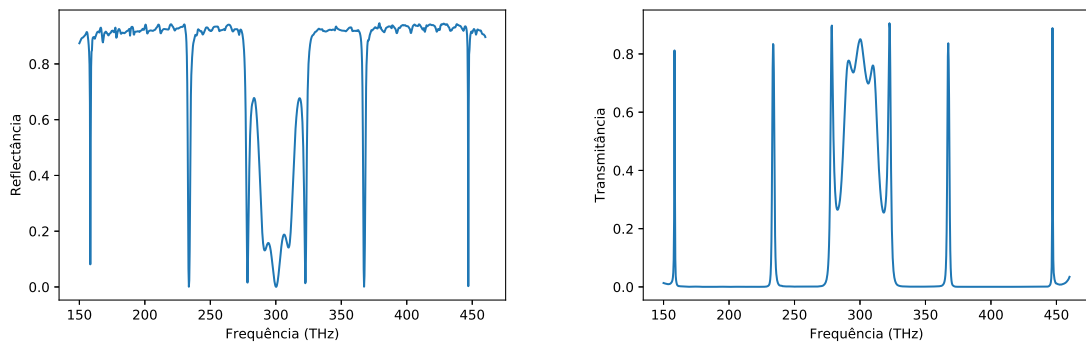
Parâmetro	Medida
Material 1	($n = 1,4508213183$)
Material 2	($n = 1,4560213183$)
Material 3	($n = 3,5727714123$)
Largura A (μm)	0,1717007827
Largura B (μm)	0,0699736902
Diâmetro da Casca (μm)	125
Diâmetro do Núcleo (μm)	8,2
λ_{QCF} (μm)	1,0

Fonte: Produzido pelo autor.

5.3.2 Resultados

Observando-se a Figura 5.5, é possível afirmar que ao se usar um material de índice de refração maior, as bandas passa faixa diminuem significativamente.

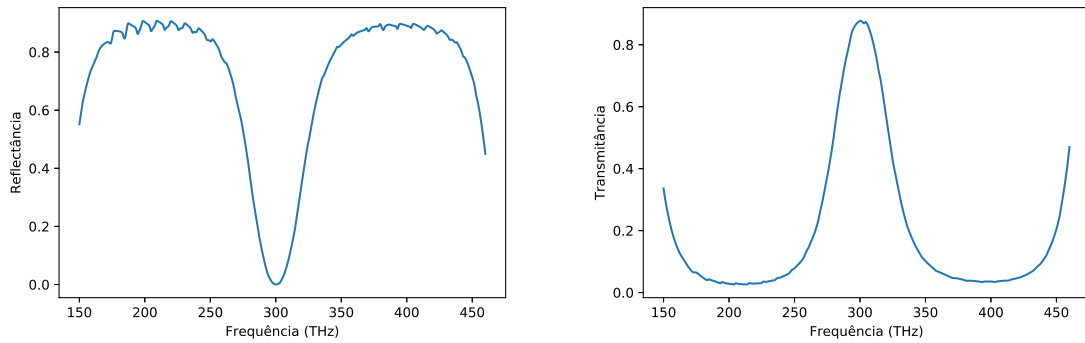
Figura 5.5 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 5$ para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Já para um valor menor de k , para esse caso, apresentam valores reflectância consideravelmente maiores do que no caso anterior. Isso é claramente evidenciado na Figura 5.6, em que as bandas rejeita faixa chegam a apresentar reflectâncias até maiores do que 80%.

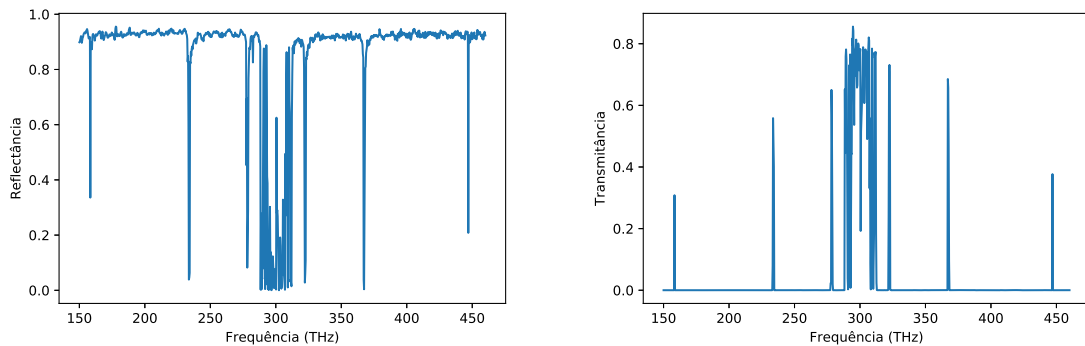
Figura 5.6 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 3$ para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Enquanto isso, ao se analisar o guia de onda proposto para um $k = 10$, as respostas apresentadas na Figura 5.7 mostra que embora as oscilações diminuam, aumenta-se a absorvância para essa configuração.

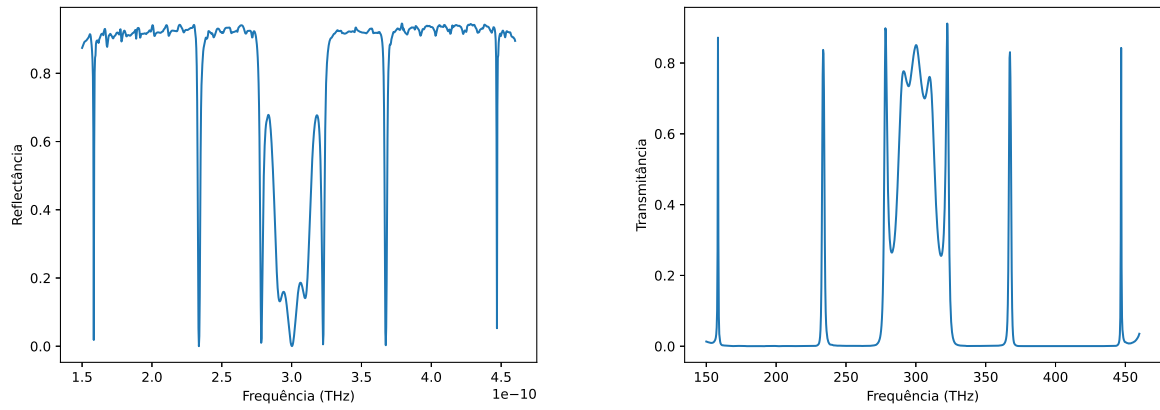
Figura 5.7 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 10$ para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Uma última análise feita para esse guia de onda proposto é o seu comportamento para valores mais altos de temperatura. A Figura 5.8 apresenta a reflectância e transmitância ao se elevar a temperatura para $300K$. Isso mostra que o guia de onda proposto apresenta uma alteração no espectro de $169,2pm$, obtendo-se uma sensibilidade de $33,8pm/K$.

Figura 5.8 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 5$ para o guia de onda proposto com a temperatura à $300K$.



Fonte: Produzido pelo autor.

Capítulo 6

Fibra Óptica com Núcleo Segmentado Obedecendo a Sequência de Período Duplo

6.1 Sequência de Período Duplo

A Sequência de Período Duplo constitui um sistema quase periódico composto por dois blocos iniciais (A e B), seguindo regras análogas às da Sequência de Thue-Morse ([VASCONCELOS; ALBUQUERQUE; MARIZ, 1998](#)):

$$S_k = S_{k-1}S_{k-1}^+ \quad (6.1)$$

Porém, para esse caso, S_k^+ possui a seguinte igualdade:

$$S_k^+ = S_{k-1}S_{k-1} \quad (6.2)$$

Para isso, precisa-se que $S_0 = A$, $S_0^+ = B$ e $k \geq 1$. Dessa forma, a sequência seria a seguinte:

$$S_0 = [A], S_1 = [AB], S_2 = [ABAA], S_3 = [ABAAABAB], \text{ etc.} \quad (6.3)$$

O comportamento dessa sequência em óptica para cristais unidimensionais já foi estudada inicialmente no trabalho de [VASCONCELOS; ALBUQUERQUE; MARIZ \(1998\)](#).

Tabela 9 – Modelos a serem analisados usando a sequência de Período Duplo.

	Estudo de Caso 5	Estudo de Caso 6	Estudo de Caso 7
Material 1	SiO_2	SiO_2	SiO_2
Material 2	SiO_2 dopado	SiO_2 dopado	SiO_2 dopado1
Material 3	TiO_2	Si	SiO_2 dopado2
Tipo de Guia	Circular	Circular	Fibra Óptica

Fonte: Produzido pelo autor.

6.2 Estudo de Caso 5

6.2.1 Parâmetros da Simulação

Para os parâmetros do Estudo de Caso 5, novamente será usado, tanto para a grade quanto para o núcleo, os valores apresentados por VASCONCELOS; ALBUQUERQUE; MARIZ (1998) como uma forma de introduzir os novos estudos.

Tabela 10 – Parâmetros de simulação do Estudo de Caso 5

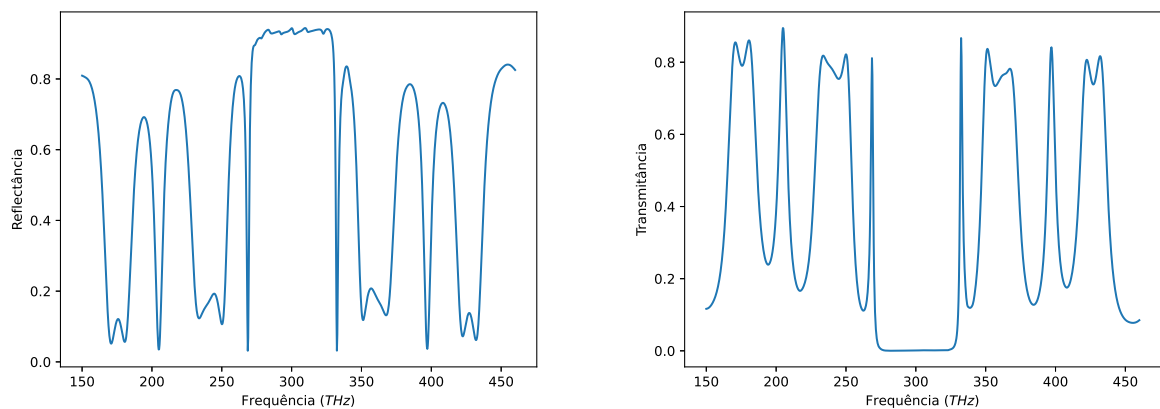
Parâmetro	Medida
Material 1	($n = 1,444024$)
Material 2	($n = 1,45$)
Material 3	($n = 2,3$)
Largura A (μm)	0,17253266
Largura B (μm)	0,10869565
Diâmetro da Casca (μm)	125
Diâmetro do Núcleo (μm)	8,2
λ_{QCF} (μm)	1,0

Fonte: Produzido pelo autor.

6.2.2 Resultados

Primeiro pode-se observar na Figura 6.1 que a segmentação no núcleo do guia de onda, seguindo a sequência de período duplo, possui respostas similares ao cristal apresentado por VASCONCELOS; ALBUQUERQUE; MARIZ (1998) para $k = 5$.

Figura 6.1 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 5$ para o guia de onda proposto.

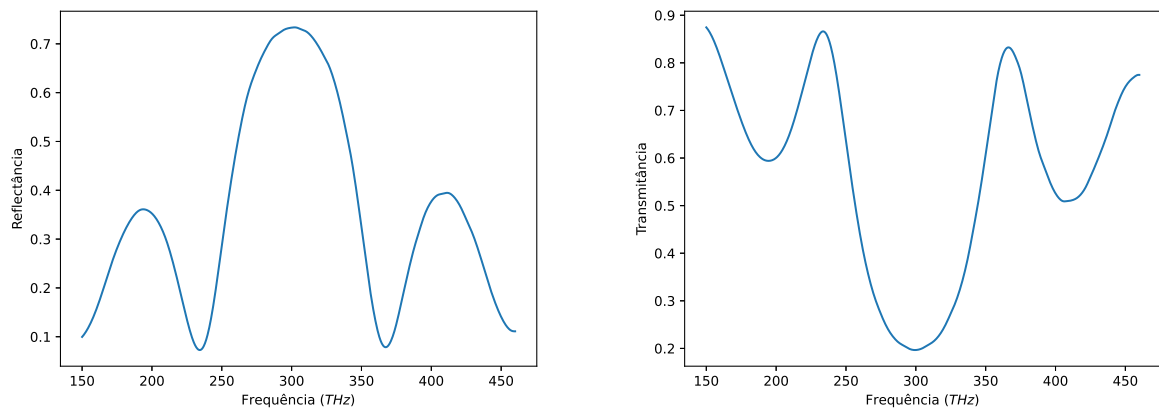


Fonte: Produzido pelo autor.

É possível também analisar esse tipo de resposta para um valor de k menor e maior do que o anteriormente proposto. Quando se determina k como 3, observa-se na Figura 6.2

que as oscilações, tanto na reflectância como na transmitância, para as frequências que não estão situadas na banda central diminuem. Porém, o sinal refletido na banda central terá menor intensidade.

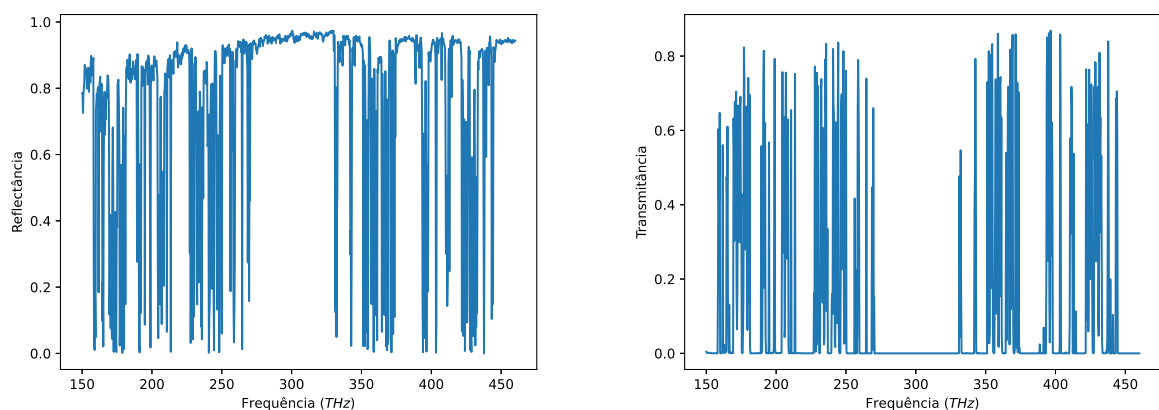
Figura 6.2 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 3$ para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Já quando se aumenta o valor de k para 10, as oscilações aumentam muito, como pode ser observado na Figura 6.3.

Figura 6.3 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 10$ para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

6.3 Estudo de Caso 6

6.3.1 Parâmetros da Simulação

Para o Estudo de Caso 6 será usada a equação de Sellmeier e os dados obtidos em (FREY; LEVITON; MADISON, 2006) e (LEVITON; FREY, 2006). Dessa forma, o estudo terá os seguintes parâmetros:

Tabela 11 – Parâmetros de simulação do Estudo de Caso 6

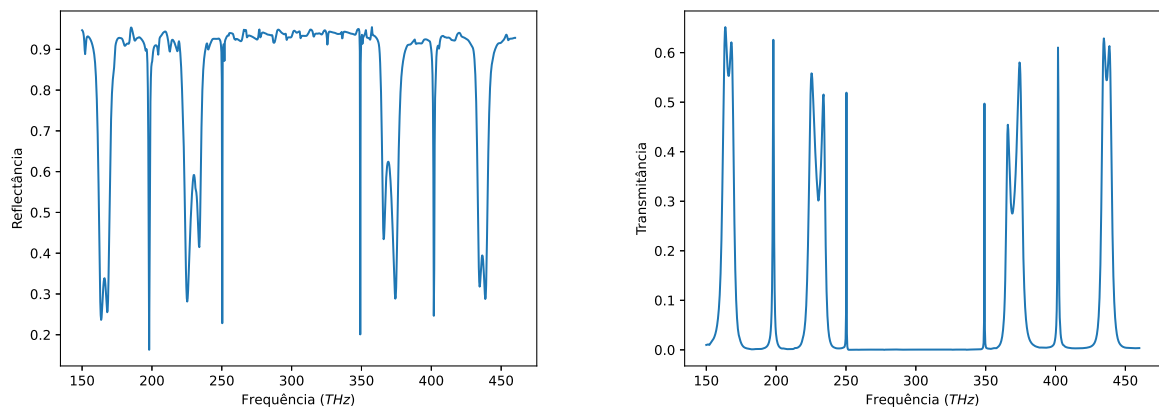
Parâmetro	Medida
Material 1	($n = 1,4508213183$)
Material 2	($n = 1,4560213183$)
Material 3	($n = 3,5727714123$)
Largura A (μm)	0,1717007827
Largura B (μm)	0,0699736902
Diâmetro da Casca (μm)	125
Diâmetro do Núcleo (μm)	8,2
λ_{QCF} (μm)	1,0

Fonte: Produzido pelo autor.

6.3.2 Resultados

Primeiro pode-se observar na Figura 6.4 que a segmentação no núcleo do guia de onda, seguindo a sequência de período duplo, e agora usando-se Si no lugar de TiO_2 , possui respostas significativamente diferentes das apresentadas por VASCONCELOS; ALBUQUERQUE; MARIZ (1998) para $k = 5$. Isso demonstra que essa sequência quase periódica é mais sensível a mudança de materiais do que algumas outras que foram estudadas.

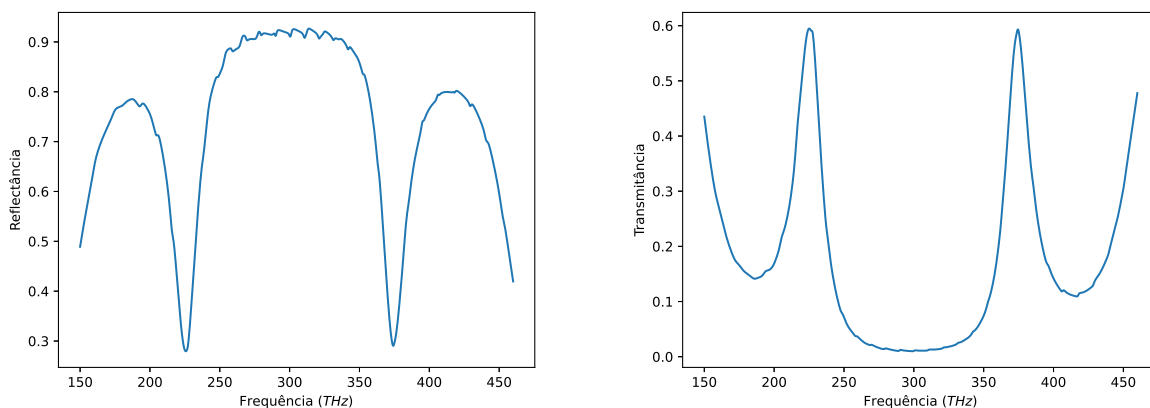
Figura 6.4 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 5$ para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

É possível examinar essa resposta para valores de k tanto menores quanto maiores do que o anteriormente proposto. Ao definir k como 3, observa-se na Figura 6.5 que a faixa central de rejeição é ainda mais destacada do que no caso de estudo anterior, alcançando reflexões com valores superiores a 90%.

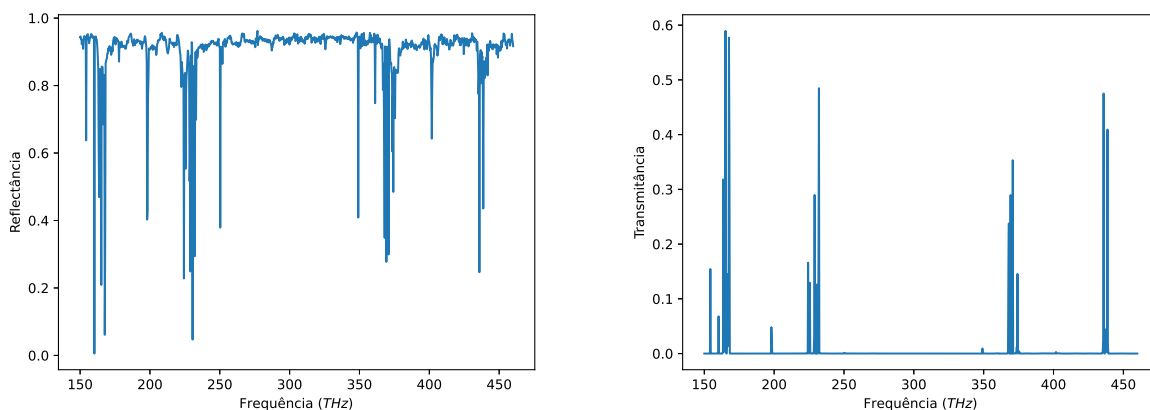
Figura 6.5 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 3$ para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Já quando se aumenta o valor de k para 10, a transmitância dos sinais estudados ultrapassa 60% para nenhuma frequência, como pode ser observado na Figura 6.6.

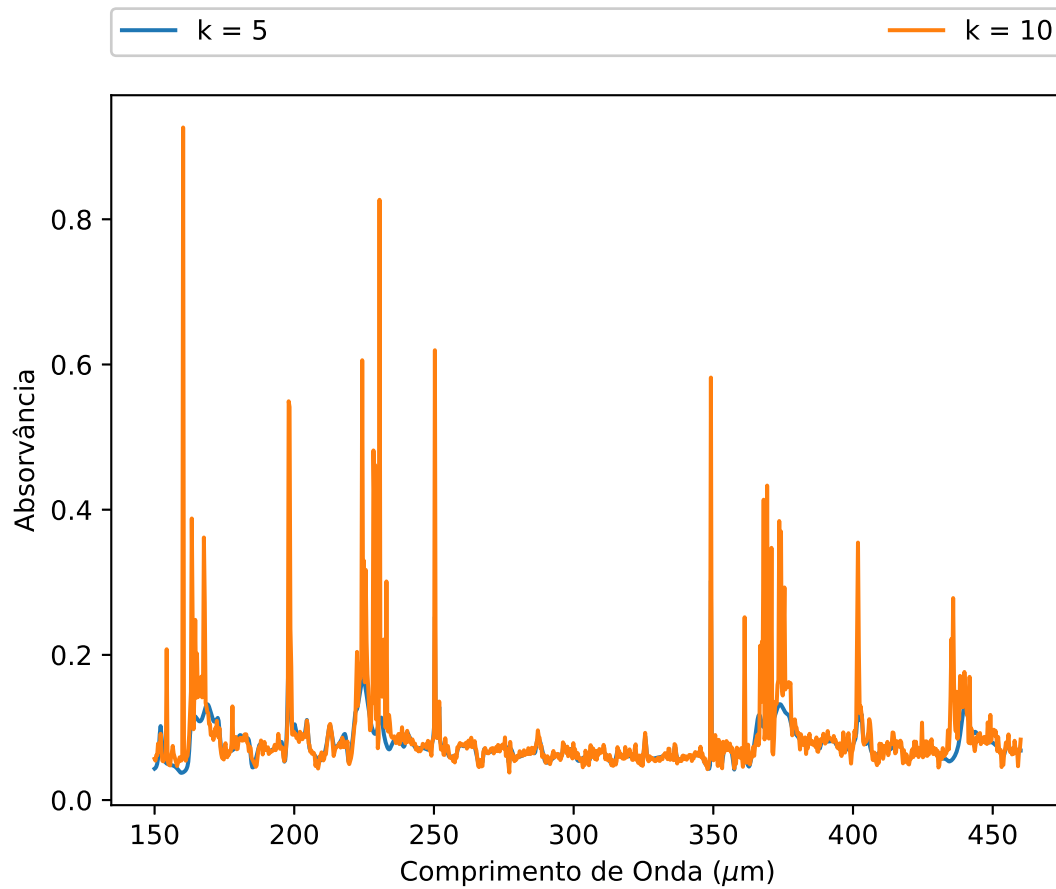
Figura 6.6 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 10$ para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Também é possível observar, pela Figura 6.7, que a absorvância aumenta significativamente para $k = 10$.

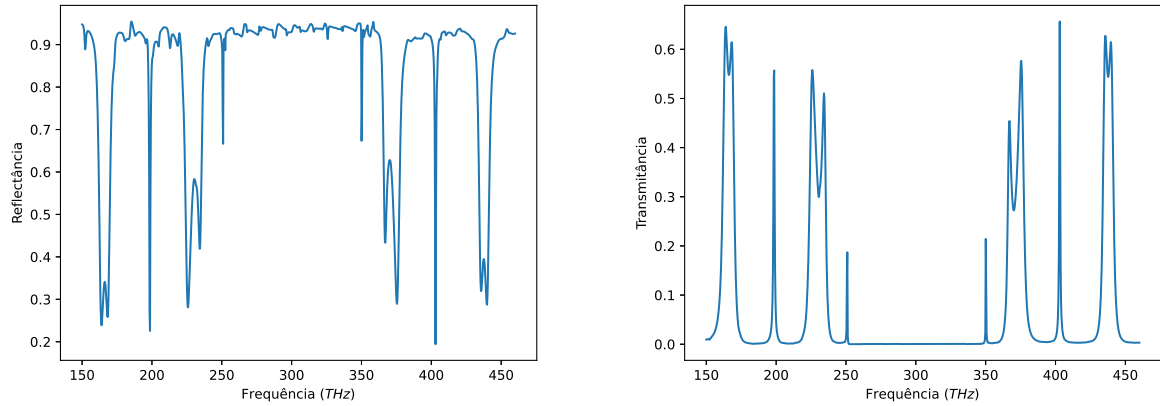
Figura 6.7 – Absorvâncias para $k = 5$ (linha azul) e $k = 10$ (linha laranja) para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Ao ser empregada como sensor de temperatura, esta configuração apresenta uma alteração no espectro de $2,5906\text{nm}$ ao elevar a temperatura de 295K para 300K , como pode ser observado na Figura 6.8, resultando em uma sensibilidade de $518,1\text{pm/K}$.

Figura 6.8 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 5$ para o guia de onda proposto em uma temperatura de $300K$.



Fonte: Produzido pelo autor.

6.4 Estudo de Caso 7

6.4.1 Parâmetros da Simulação

Para o Estudo de Caso 7 será analisada uma fibra óptica, com a casca sendo composta por dióxido de silício, com índice de refração obtida usando a equação de Sellmeier e os dados obtidos em (LEVITON; FREY, 2006), e o núcleo com esse mesmo material dopado, adicionando-se um valor de 0,0052 ao índice de refração do material puro. Para a grade, foi usado um Δn de 0,005. Esse valor alto foi usado com o intuito de diminuir o esforço computacional da simulação. Os parâmetros de simulação foram resumidos na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros de simulação do Estudo de Caso 7

Parâmetro	Medida
Material 1	($n = 1,4508213183$)
Material 2	($n = 1,4560213183$)
Material 3	($n = 1,4610213183$)
Largura A (μm)	0,1717007827
Largura B (μm)	0,1711131773
Diâmetro da Casca (μm)	125
Diâmetro do Núcleo (μm)	8,2
λ_{QCF} (μm)	1,0

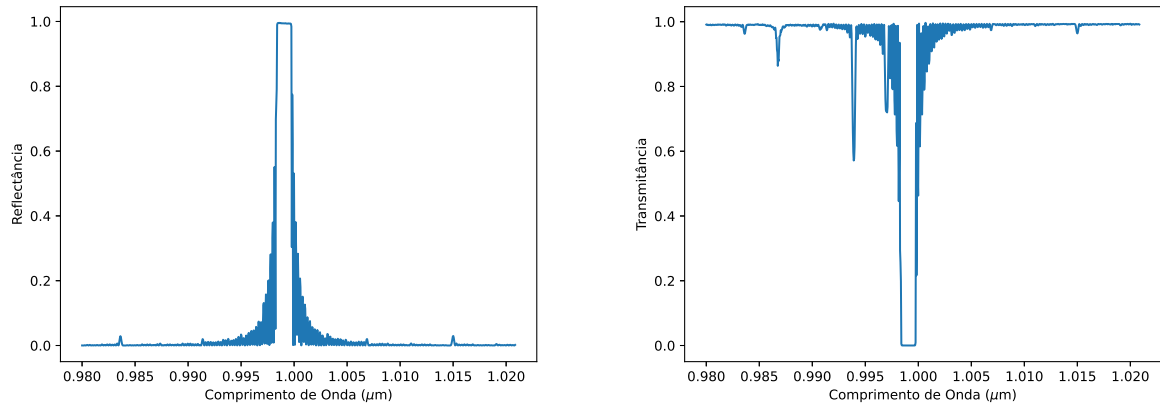
Fonte: Produzido pelo autor.

6.4.2 Resultados

Ao projetar um encadeamento de acordo com a sequência de período duplo com $k = 13$, obtém-se uma grade com aproximadamente $1,405mm$ de comprimento. A Figura 6.9 ilus-

tra tanto a resposta de reflectância quanto de transmitância dessa fibra a uma temperatura de $T = 295K$. Observa-se que, embora a banda proibida não esteja centrada exatamente no λ_{QCF} projetado de $1\mu m$, ela se encontra muito próxima.

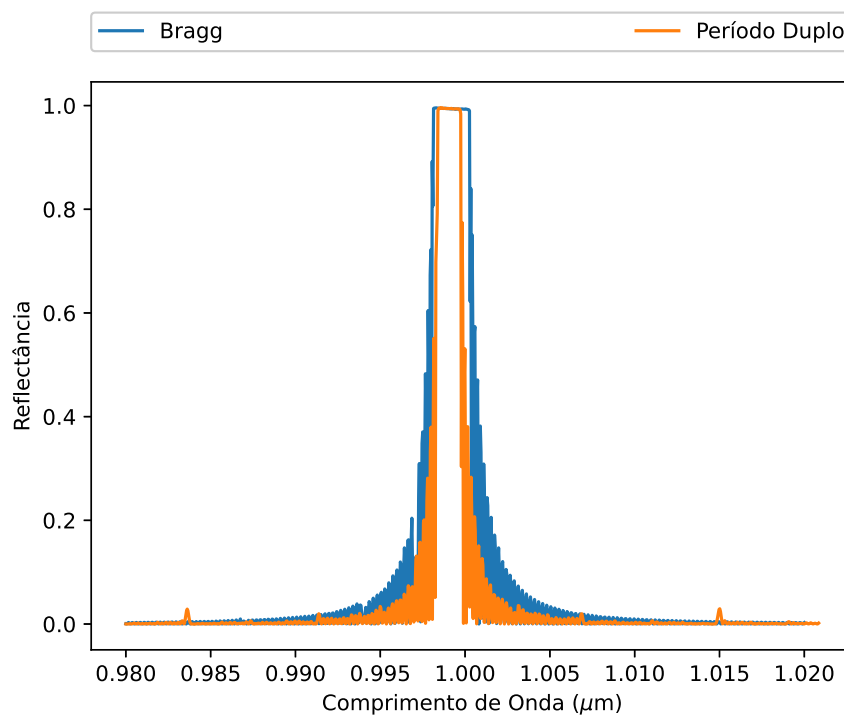
Figura 6.9 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 13$ para a fibra com a segmentação proposta.



Fonte: Produzido pelo autor.

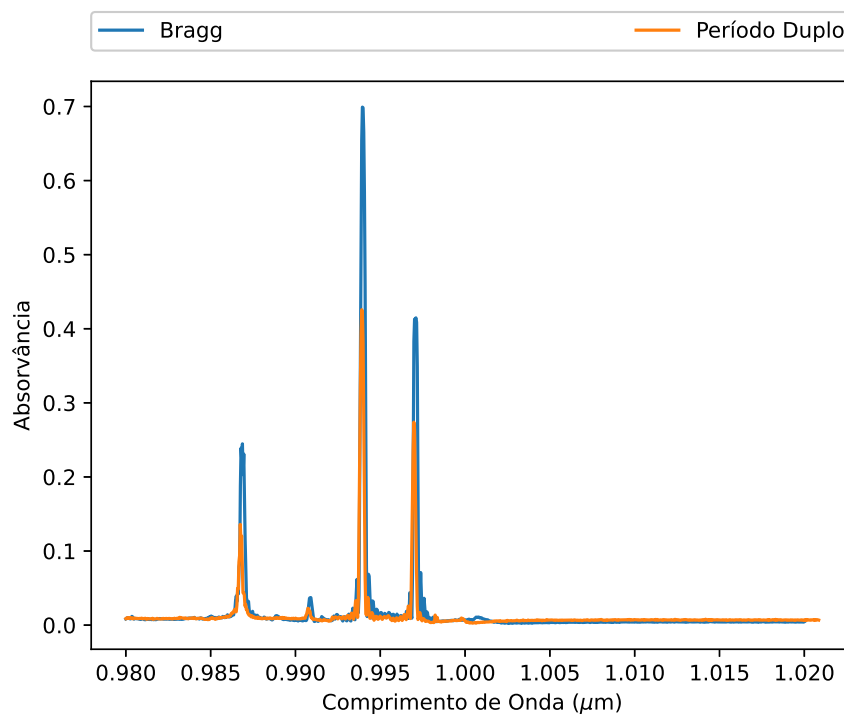
É possível observa-se a partir do comparativo da Figura 6.10 que a fibra óptica proposta possui uma banda proibida menor do que um FBG de aproximadamente mesmo comprimento. Porém, a mesma possui a vantagem de apresentar uma resposta de absorvância menor do que a sua contraparte periódica, como pode ser visto na Figura 6.11. Isso provavelmente se deve ao fato de o guia de onda proposto possuir uma quantidade menor de blocos do material 3 (2731) do que o FBG usado como comparativo (4099).

Figura 6.10 – Comparativo da reflectância da fibra com grade de bragg (linha azul) com a reflectância da grade seguindo a sequência de período duplo (linha laranja).



Fonte: Produzido pelo autor.

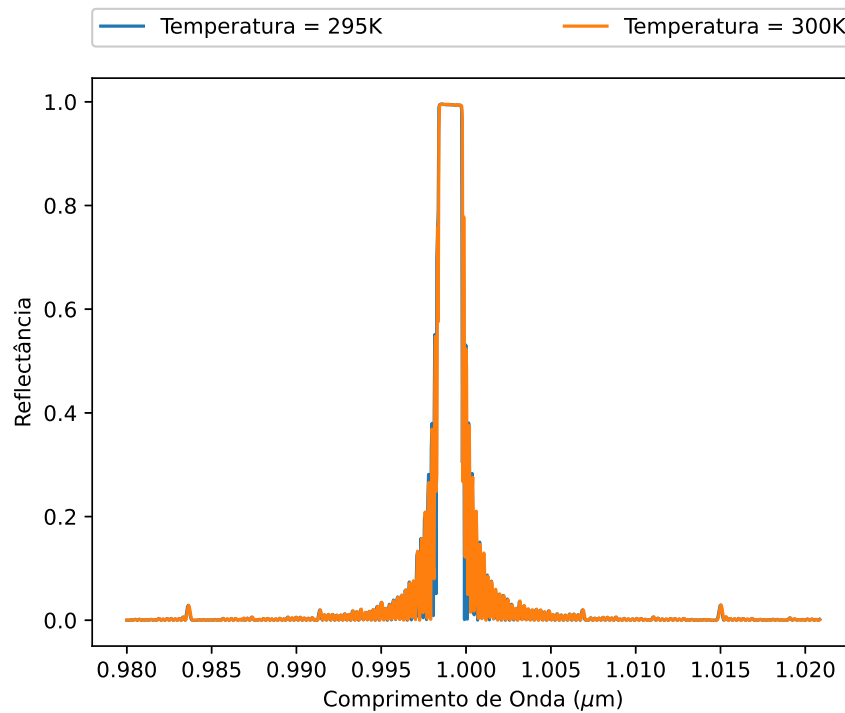
Figura 6.11 – Comparativo da absorvância da fibra com grade de bragg (linha azul) com a absorvância da grade seguindo a sequência de período duplo (linha laranja).



Fonte: Produzido pelo autor.

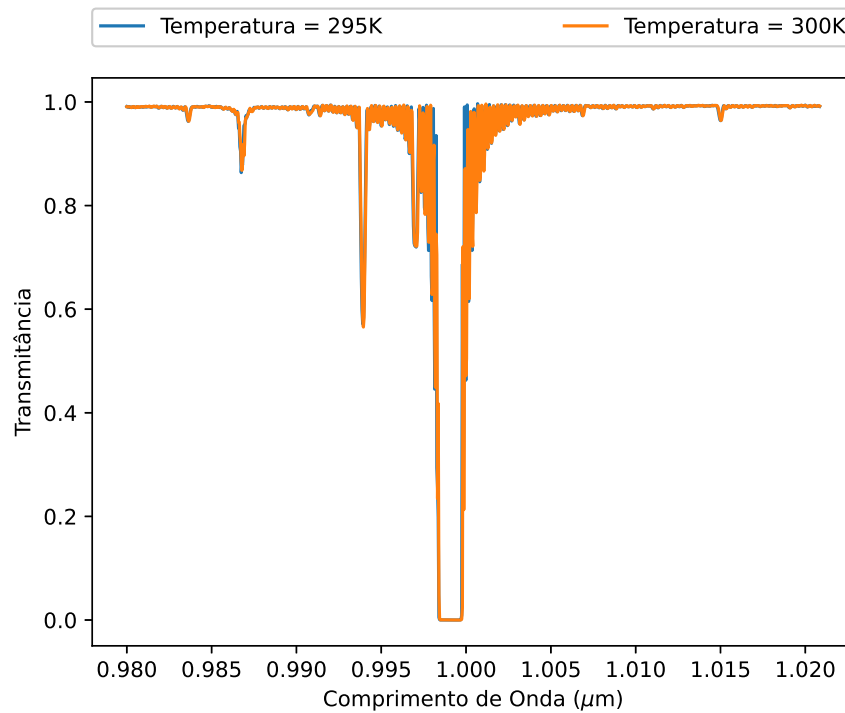
Uma boa aplicação para essa fibra óptica projetada seria o seu uso como sensor de temperatura. As Figuras 6.12 e 6.13 mostram como as suas respostas de reflectância e transmitância variariam ao se aumentar a temperatura de $295K$ para $300K$.

Figura 6.12 – Comparativo da reflectância da fibra com grade seguindo a sequência de período duplo à $295K$ (linha azul) e à $300K$ (linha laranja).



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 6.13 – Comparativo da transmitância da fibra com grade seguindo a sequência de período duplo à $295K$ (linha azul) e à $300K$ (linha laranja).



Fonte: Produzido pelo autor.

É possível observar que iria ocorrer uma variação de localização do centro da banda proibida de $0,0407nm$ de um caso para outro. Em comparativo, para a grade de bragg de aproximadamente mesmo comprimento, essa variação seria de $0,04nm$. Isso equivale à uma sensibilidade de $8,1pm/K$ contra $8pm/K$ do FBG de referência.

Capítulo 7

Fibra Óptica com Núcleo Segmentado Obedecendo a Sequência de Octonacci

7.1 Sequência de Octonacci

A sequência de Octonacci, de maneira análoga aos casos anteriores, segue um padrão sequencial entre dois blocos (A e B). Para iniciar, a primeira sequência (S_1) é definida como sendo idêntica ao bloco A, enquanto a segunda sequência (S_2) consiste unicamente no bloco B. Todavia, quando k é superior a 2, a sequência adere a uma regra específica. Essa regra, que delinea o comportamento subsequente da sequência, pode ser detalhada da seguinte maneira:

$$S_k = S_{k-1}S_{k-2}S_{k-1} \quad (7.1)$$

Dessa maneira, a sequência se configura da seguinte forma:

$$S_1 = [A], S_2 = [B], S_3 = [BAB], S_4 = [BABBBAB], \text{ etc.} \quad (7.2)$$

Na área de óptica, esse tipo de sequenciamento já foi anteriormente estudado no trabalho de [BRANDÃO et al. \(2015\)](#) em quase cristais fotônicos.

Os “Estudos de Caso” realizados com esse tipo de sequenciamento foram os seguintes:

Tabela 13 – Modelos a serem analisados usando a sequência de Octonacci.

	Estudo de Caso 8	Estudo de Caso 9
Material 1	SiO_2	SiO_2
Material 2	SiO_2 dopado	SiO_2 dopado
Material 3	TiO_2	Si
Tipo de Guia	Circular	Circular

Fonte: Produzido pelo autor.

7.2 Estudo de Caso 8

7.2.1 Parâmetros da Simulação

Para o primeiro caso usando a sequência de octonacci na segmentação do núcleo do guia de onda, foram adotados parâmetros similares àqueles usados em (BRANDÃO et al., 2015), porém nesse caso centrando λ_{QCF} em $1\mu m$ ao invés de $700nm$. Um resumo dos parâmetros pode ser visto na Tabela 14.

Tabela 14 – Parâmetros de simulação do Estudo de Caso 8

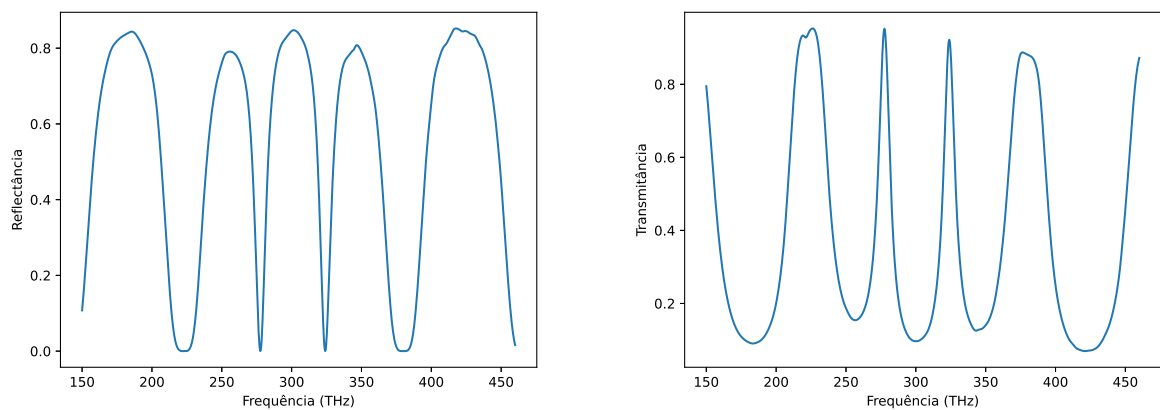
Parâmetro	Medida
Material 1	($n = 1,444024$)
Material 2	($n = 1,45$)
Material 3	($n = 2,3$)
Largura A (μm)	0,17253266
Largura B (μm)	0,10869565
Diâmetro da Casca (μm)	125
Diâmetro do Núcleo (μm)	8,2
λ_{QCF} (μm)	1,0

Fonte: Produzido pelo autor.

7.2.2 Resultados

Ao se observar a resposta da reflectância e transmitância apresentada na Figura 7.1 do guia de onda para $k = 5$, é possível ver uma mudança em relação à apresentada no trabalho de BRANDÃO et al. (2015). A mudança mais evidente é amplitude das bandas passa faixa que não atingem em nenhum momento 100% de transmitância como mostrado no trabalho anteriormente citado.

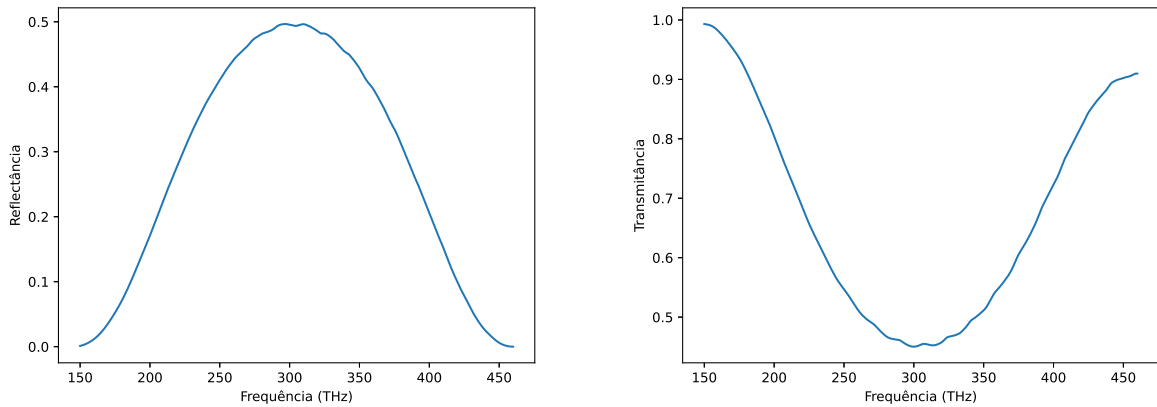
Figura 7.1 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 5$ para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Já para quando $k = 3$, é possível ver na Figura 7.2 que a reflectância da banda proibida não atinge 50%, possuindo pouco uso para esse caso.

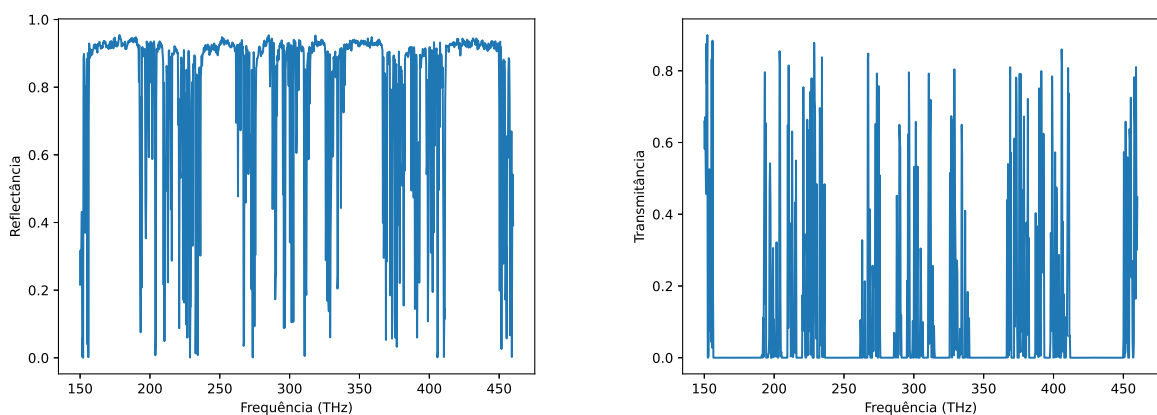
Figura 7.2 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 3$ para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Ao se analisar a mesma configuração de guia de onda, porém agora com $k = 10$, é evidente um aumento das oscilações das suas repostas apresentadas na Figura 7.3. Para esse caso, apenas as bandas proibidas ficam melhor definidas.

Figura 7.3 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 10$ para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

7.3 Estudo de Caso 9

7.3.1 Parâmetros da Simulação

Para o Estudo de Caso 9, novamente será usada a equação de Sellmeier e os dados obtidos em (FREY; LEVITON; MADISON, 2006) e (LEVITON; FREY, 2006). Com isso, é possível obter os seguintes parâmetros:

Tabela 15 – Parâmetros de simulação do Estudo de Caso 9

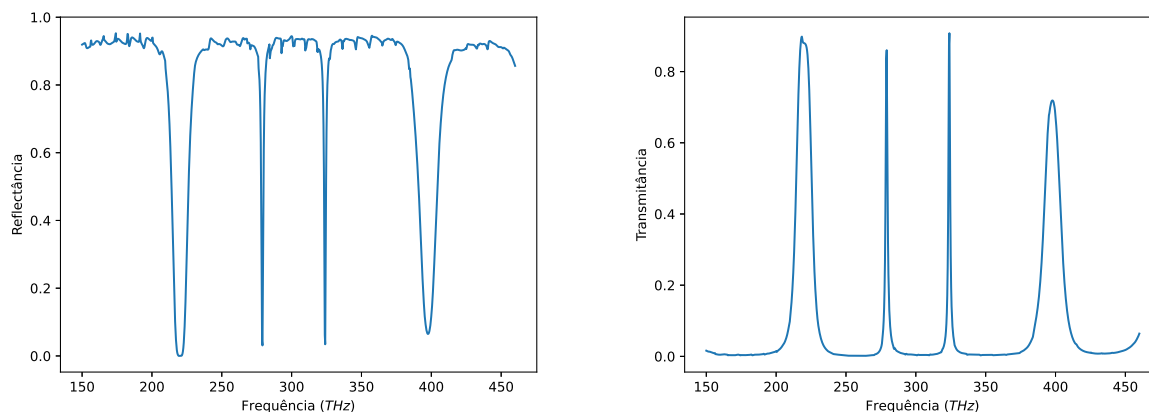
Parâmetro	Medida
Material 1	($n = 1,4508213183$)
Material 2	($n = 1,4560213183$)
Material 3	($n = 3,5727714123$)
Largura A (μm)	0,1717007827
Largura B (μm)	0,0699736902
Diâmetro da Casca (μm)	125
Diâmetro do Núcleo (μm)	8,2
λ_{QCF} (μm)	1,0

Fonte: Produzido pelo autor.

7.3.2 Resultados

Inicialmente, é possível observar pela Figura 7.4 que ao se usar o silício no lugar do dióxido de titânio fez com que os valores de reflectância das bandas proibidas aumentassem, ao mesmo tempo que as larguras das mesmas se expandiram. Porém, ao mesmo tempo, aumentou-se a absorvância para frequências mais altas.

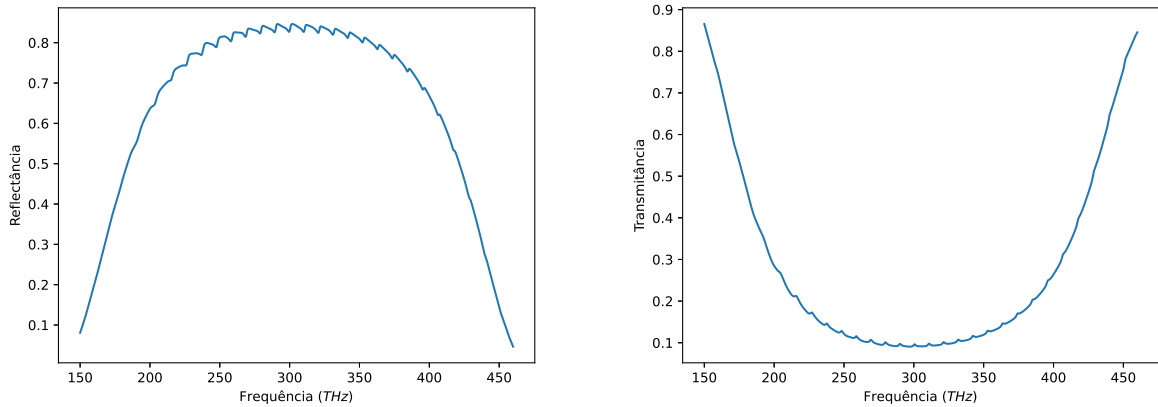
Figura 7.4 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 5$ para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Também é observado um certo aprimoramento, em relação ao estudo de caso anterior, dos valores de reflectância para $k = 3$, como pode ser visto na Figura 7.5.

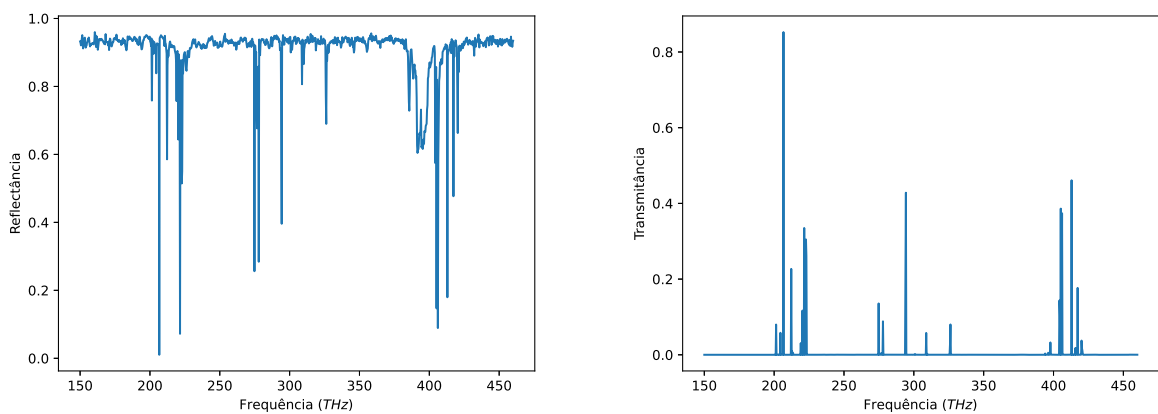
Figura 7.5 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 3$ para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Já ao se aumentar o valor de k para 10, foi possível que apenas para poucas frequências é possível transmitir um sinal, como é o caso mais proeminente de $206,67332667332667 THz$. Isso faz com que estabeleça poucas banda de passa faixa, algo observado na Figura 7.6

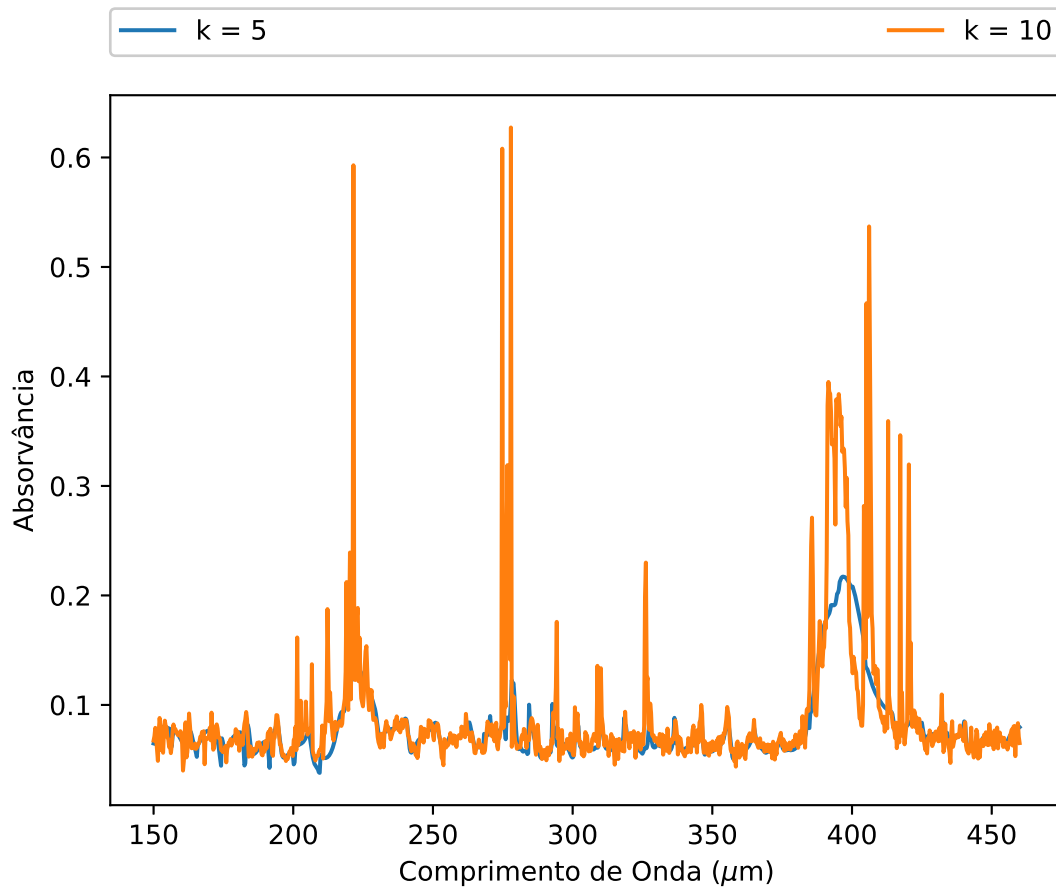
Figura 7.6 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 10$ para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Também é possível observar, pela Figura 7.7, que novamente a absorvância aumenta significativamente para $k = 10$.

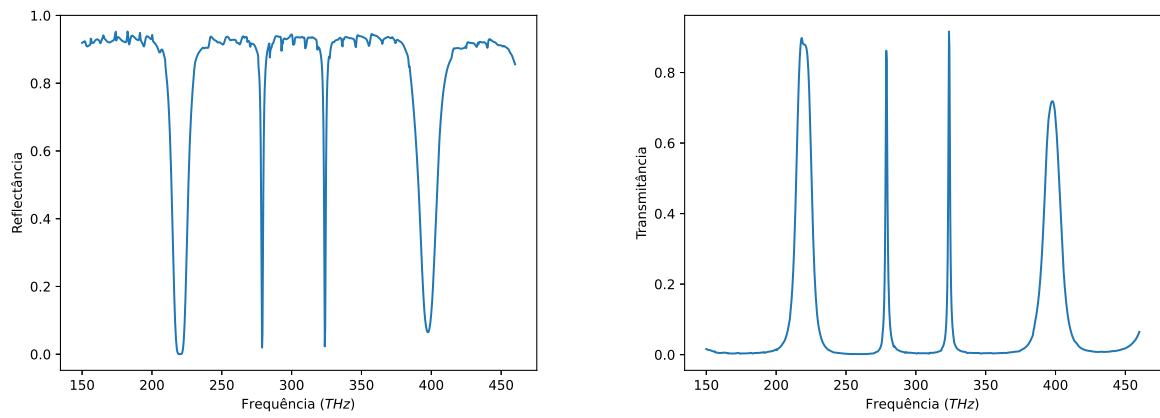
Figura 7.7 – Absorvâncias para $k = 5$ (linha azul) e $k = 10$ (linha laranja) para o guia de onda proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Quando utilizada como sensor de temperatura, a presente configuração demonstra uma modificação no espectro de $1,0389\text{nm}$ ao variar a temperatura de 295K para 300K , conforme destacado na Figura 7.8. Essa variação no espectro fornece informações valiosas sobre a sensibilidade da configuração às mudanças térmicas, sendo essa sensibilidade medida em $207,8\text{pm/K}$.

Figura 7.8 – Reflectância (esquerda) e Transmitância (direita) com $k = 5$ para o guia de onda proposto em uma temperatura de $300K$.



Fonte: Produzido pelo autor.

Capítulo 8

Conclusão e Trabalhos Futuros

8.1 Conclusões

Nesta tese de doutorado, uma extensa série de simulações de guias de onda com núcleo segmentado foi conduzida, explorando sequências quase periódicas específicas: a Generalizada de Fibonacci, Thue-Morse, Período Duplo e Octonacci. O software COMSOL[®], reconhecido pela sua eficácia em estudos dessa natureza, foi utilizado para realizar essas simulações. Ao longo desses experimentos, diversas configurações de materiais foram examinadas, buscando compreender o comportamento desses guias de onda segmentados sob a influência de diferentes sequências quase periódicas.

Os resultados obtidos revelaram uma boa concordância com estudos anteriores realizados utilizando o método das matrizes, validando a eficácia das simulações realizadas no COMSOL[®]. Destaca-se a promissora compatibilidade dos guias de onda segmentados com as sequências Generalizada de Fibonacci e Thue-Morse quando aplicados como filtros. Essas configurações mostraram-se particularmente eficientes, proporcionando resultados robustos e promissores para aplicações de filtragem.

Além disso, identificou-se que os guias de onda segmentados com sequências de Período Duplo e Octonacci demonstraram potencial significativo como sensores de temperatura. Os dados obtidos nessas simulações indicam uma sensibilidade notável a variações de temperatura, apontando para a viabilidade dessas configurações como dispositivos sensoriais em aplicações térmicas.

Em resumo, este estudo não apenas contribuiu para o entendimento do comportamento de guias de onda segmentados com sequências quase periódicas, mas também destacou possíveis aplicações práticas, com ênfase em filtros e sensores de temperatura. Esses resultados promissores oferecem uma base sólida para futuras investigações e desenvolvimentos, ressaltando o potencial dessas configurações para avanços significativos em tecnologias ópticas e de sensoriamento.

8.2 Trabalhos Futuros

Considerando os resultados promissores obtidos neste estudo ao explorar guias de onda com núcleos segmentados seguindo diferentes sequências quase periódicas, abre-se uma interessante perspectiva para futuras investigações. Dentre os caminhos a serem explorados, destaca-se a exploração de outros tipos de sequenciamentos em núcleos de guia de onda ópticos, expandindo a gama de possibilidades e potencialidades desses dispositivos.

Uma abordagem sugerida seria investigar sequências quase periódicas menos convencionais ou personalizadas, adaptando-as às necessidades específicas de determinadas aplicações. Isso pode incluir a análise de sequências geradas por algoritmos específicos, buscando otimizar características desejadas nos guias de onda, como propriedades espectrais ou sensibilidades a determinados parâmetros ambientais.

Além disso, um campo promissor para futuros trabalhos seria a exploração desses guias de onda com núcleos segmentados como sensores multifuncionais. Os sensores de grade de Bragg têm sido amplamente utilizados para medir grandezas como pressão e concentração de líquidos. Dessa forma, estender a aplicabilidade desses guias de onda segmentados para funções sensoriais diversificadas, tais como sensores de pressão, ou até mesmo sensores de concentração de líquidos, representa uma área de pesquisa promissora.

Essa expansão de funcionalidades abre portas para a criação de dispositivos ópticos altamente versáteis e adaptáveis a diferentes cenários e aplicações. A combinação de sequências quase periódicas específicas com os guias de onda segmentados pode resultar em sensores ópticos altamente sensíveis e seletivos, oferecendo benefícios significativos em diversas áreas, desde monitoramento ambiental até aplicações biomédicas. Em resumo, a continuidade dessa linha de pesquisa promete contribuir para o avanço contínuo na interseção entre óptica e sensores, abrindo novas possibilidades para inovação tecnológica.

Referências

- AHMED, Q. S. et al. Direct UV written waveguides and Bragg gratings in doped planar silica using a 213 nm laser. *Electronics Letters*, v. 57, n. 8, p. 331–333, apr 2021. ISSN 0013-5194. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/ell2.12126>>.
- ALAM, Z. et al. Design of a novel star type photonic crystal fiber for mid-infrared supercontinuum generation. *Optics Communications*, Elsevier Ltd., v. 500, n. April, p. 127322, 2021. ISSN 0030-4018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127322>>.
- ALI, N. B. et al. Tunable multi-band-stop filters using generalized fibonacci photonic crystals for optical communication applications. *Mathematics*, v. 10, 2022. ISSN 22277390.
- ALMEIDA, R.; GONÇALVES, M. C.; PORTAL, S. Sol–gel photonic bandgap materials and structures. *Journal of Non-Crystalline Solids*, v. 345, p. 562–569, 2003.
- ARAÚJO, C. et al. Omnidirectional band gaps in quasiperiodic photonic crystals in the THz region. *Optical Materials*, v. 35, n. 1, p. 18–24, nov 2012. ISSN 09253467. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925346712002753>>.
- ARAÚJO, C. A. A. *Excitações em cristais fotônicos unidimensionais*. 97 p. Tese (phdthesis) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2012.
- BENISTY, H. et al. Optical and Confinement Properties of Two-Dimensional Photonic Crystals. n. December, 1999.
- BILAL, A. et al. Towards cavity-enhanced photodetection in Al-doped BP integrated with 2D photonic crystal and waveguide for mid-IR wavelengths. In: *2D Photonic Materials and Devices III*. [S.l.: s.n.], 2020.
- BOCKSTALLER, M. R.; KOLB, R.; THOMAS, E. L. Metallodielectric Photonic Crystals Based on Diblock Copolymers. *Advanced Materials*, v. 13, p. 1783–1786, 2001.
- BRAGG, L.; BRAGG, W. H. The reflection of X-rays by crystals. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, v. 88, n. 605, p. 428–438, jul 1913. ISSN 0950-1207. Disponível em: <<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.1913.0040>>.
- BRANDÃO, E. R. et al. Octonacci photonic quasicrystals. *Optical Materials*, v. 46, p. 378–383, 2015. ISSN 09253467.
- BRUYANT, A. et al. All-silicon omnidirectional mirrors based on one-dimensional photonic crystals. *Applied Physics Letters*, v. 82, p. 3227–3229, 2003.
- BYKOV, V. Spontaneous Emission in a Periodic Structure. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*, v. 35, p. 269, 1972.

- CALVO, M. et al. Porous one dimensional photonic crystals: Novel multifunctional materials for environmental and energy applications. *Energy Environmental Science*, v. 4, p. 4800, 2011.
- CHEN, J.-R. et al. Large vacuum Rabi splitting in ZnO-based hybrid microcavities observed at room temperature. *Applied Physics Letters*, v. 94, p. 61103, 2009.
- CHENG, W. et al. In-Plane Elastic Excitations in 1D Polymeric Photonic Structures. *Macromolecules*, v. 39, 2006.
- CHU, S. et al. Design and analysis of surface-plasmon-resonance-based photonic quasi-crystal fiber biosensor for high-refractive-index liquid analytes. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, IEEE, v. 25, n. 2, 2019. ISSN 21910359.
- Cohen Stuart, M. et al. Emerging Applications of Stimuli-Responsive Polymer Materials. *Nature materials*, v. 9, p. 101–113, 2010.
- COHEN-TANNOUDJI, C.; DIU, B.; LALOE, F. *Quantum Mechanics*. [S.l.]: John Wiley and Sons, 1978. v. 2. ISBN 047116433X.
- COLODRERO, S.; OCAÑA, M.; MÍGUEZ, H. Nanoparticle-Based One-Dimensional Photonic Crystals. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, v. 24, p. 4430–4434, 2008.
- ECKERT, M. Max von Laue and the discovery of X-ray diffraction in 1912. *Annalen der Physik*, v. 524, n. 5, p. A83–A85, may 2012. ISSN 00033804. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.201200724>>.
- EISBERG, R. *Fundamentals of Modern Physics*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1961. 729 p. ISBN 0 471 23463 X.
- ERDOGAN, T. Fiber grating spectra. *Journal of Lightwave Technology*, v. 15, n. 8, p. 1277–1294, 1997. ISSN 07338724. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/618322/>>.
- FALAH, A. A. S.; WONG, W. R.; Mahamd Adikan, F. R. Single-mode eccentric-core D-shaped photonic crystal fiber surface plasmon resonance sensor. *Optics and Laser Technology*, Elsevier Ltd, v. 145, n. August 2021, p. 107474, 2022. ISSN 0030-3992. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107474>>.
- FERNANDES, J. A. et al. A study of transmission on cylindrical photonic quasicrystals. *Optical Materials*, v. 121, p. 111566, 2021. ISSN 0925-3467. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925346721007667>>.
- FERNANDES, L. F. d. C. *Conceitos Básicos de Fibra Óptica (Módulo I)*. 2003. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialfol/pagina_1.asp>. Acesso em: 27/08/2018.
- FILHO, F. P. de A. *Bandas Fotônicas Proibidas e Cristais Fotônicos*. [s.d.]. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/127479443-Bandas-fotonicas-proibidas-e-cristais-fotonicos-aluno-flavio-pinto-de-almeida-filho.html>>. Acesso em: 08/11/2021.
- FRASCELLA, F. et al. A Fluorescent One-Dimensional Photonic Crystal for Label-Free Biosensing Based on Bloch Surface Waves. *Sensors (Basel, Switzerland)*, v. 13, p. 2011–2022, 2013.

- FREY, B. J.; LEVITON, D. B.; MADISON, T. J. Temperature-dependent refractive index of silicon and germanium. In: ATAD-ETTEDGUI, E.; ANTEBI, J.; LEMKE, D. (Ed.). [s.n.], 2006. p. 62732J. ISBN 394753.395043.3. Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.672850>>.
- FUERTES, M. et al. Sorption Properties of Mesoporous Multilayer Thin Films. *Journal of Physical Chemistry C - J PHYS CHEM C*, v. 112, 2008.
- GE, J.; YIN, Y. Responsive Photonic Crystals. *Angewandte Chemie (International ed. in English)*, v. 50, p. 1492–1522, 2011.
- GONÇALVES, M. S.; ISAYAMA, Y. H.; HERNÁNDEZ-FIGUEROA, H. E. A novel three dimensional vector finite element method for periodic photonic devices. *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 58, n. 11, p. 2665–2668, nov 2016. ISSN 08952477. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/mop.30125>>.
- GUIMARÃES, A. D. O.; Da Silva, J. P.; DANTAS, E. R. Chromatic dispersion of an optical fiber based on photonic quasicrystals with twelve-fold symmetry and its application as directional coupling. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 14, n. 2, p. 170–183, 2015. ISSN 21791074.
- HALIR, R. et al. Waveguide sub-wavelength structures: A review of principles and applications. *Laser and Photonics Reviews*, v. 9, n. 1, p. 25–49, 2015. ISSN 18638899.
- HAN, L. 1D Photonic Crystals: Principles and Applications in Silicon Photonics. In: *Theoretical Foundations and Application of Photonic Crystals*. InTech, 2018. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/theoretical-foundations-and-application-of-photonic-crystals/1d-photonic-crystals-principles-and-applications-in-silicon-photonics>>.
- HILL, K. O. et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. *Applied Physics Letters*, v. 32, n. 10, p. 647–649, may 1978. ISSN 0003-6951. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.89881>>.
- JANTZEN, S. L. et al. Inscription methods for co-located fibre Bragg gratings using small spot direct UV writing. *Electronics Letters*, v. 57, n. 14, p. 556–558, jul 2021. ISSN 0013-5194. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/ell2.12190>>.
- JOANNOPOULOS, J. D. et al. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light (Second Edition)*. 2. ed. Princeton University Press, 2008. ISBN 9781400828241. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/10.2307/j.ctvc4m4gz9>>.
- JOHN, S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Physical Review Letters*, v. 58, n. 23, p. 2486–2489, jun 1987. ISSN 0031-9007. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.58.2486>>.
- KAPLAN, N. et al. Magnetic Optical FBG Sensors Using Optical Frequency-Domain Reflectometry. *IEEE Transactions on Magnetics*, PP, p. 1–4, 2018.
- KARAMAN, M.; KOOI, S.; GLEASON, K. Vapor Deposition of Hybrid Organic–Inorganic Dielectric Bragg Mirrors having Rapid and Reversibly Tunable Optical Reflectance. *Chemistry of Materials - CHEM MATER*, v. 20, 2008.
- KAWAKAMI, S. et al. Fabrication of 3D Photonic Crystals by Autoclaving and Its Applications. v. 82, n. 10, p. 43–52, 1999.

KAZMIERCZAK, T. et al. Polymeric One-Dimensional Photonic Crystals by Continuous Coextrusion. *Macromolecular Rapid Communications*, v. 28, p. 2210–2216, 2007.

KINOSHITA, S.; YOSHIOKA, S. Structural colors in nature: the role of regularity and irregularity in the structure. *Chemphyschem : a European journal of chemical physics and physical chemistry*, v. 6 8, p. 1442–1459, 2005.

KOMIKADO, T. et al. Multi-layered mirrors fabricated by spin-coating organic polymers. *Thin Solid Films*, v. 515, p. 3887–3892, 2007.

KURT, P. et al. Structural color via layer-by-layer deposition: Layered nanoparticle arrays with near-UV and visible reflectivity bands. *Journal of Materials Chemistry - J MATER CHEM*, v. 19, 2009.

LAERE, F. V. et al. Compact and Highly Efficient Grating Couplers Between Optical Fiber and Nanophotonic Waveguides. *J. Lightwave Technol.*, OSA, v. 25, n. 1, p. 151–156, jan 2007. Disponível em: <<http://www.osapublishing.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-25-1-151>>.

LEE, S. H.; HA, N. Y. Sol-gel substrates with engineered multiple photonic bandgaps for full-color photonic devices. *Small*, v. 7 19, p. 2704–2708, 2011.

LEVITON, D. B.; FREY, B. J. Temperature-dependent absolute refractive index measurements of synthetic fused silica. In: . [S.l.]: SPIE, 2006. v. 6273, p. 62732K. ISBN 0819463388. ISSN 0277786X.

LIANG, W. et al. Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors. *Applied Physics Letters*, v. 86, n. 15, p. 1–3, 2005. ISSN 00036951.

LIU, H. et al. Photonic quasi-crystal fiber with high birefringence. *Optical Engineering*, v. 55, n. 3, p. 036101, 2016. ISSN 0091-3286.

LOTSCH, B.; OZIN, G. Clay Bragg Stack Optical Sensors. *Advanced Materials*, v. 20, p. 4079–4084, 2008.

MELTZ, G.; MOREY, W. W.; GLENN, W. H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Optics Letters*, v. 14, n. 15, p. 823, aug 1989. ISSN 0146-9592. Disponível em: <<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ol-14-15-823>>.

MOCK, A.; LU, L. Two-Dimensional Photonic Crystal Micro-Cavities for Chip-Scale Laser Applications. In: KIM, Y. (Ed.). *Recent Optical and Photonic Technologies*. IntechOpen, 2010. Disponível em: <<https://www.intechopen.com/chapters/6523>>.

NAKAO, M. et al. Fabrication of GaAs hole array as a 2D-photonic crystal and their application to photonic bandgap waveguide. p. 183–193, 2002.

NI, Y. et al. A high efficient method for demodulation of FBG sensors. *Optical Fiber Technology*, v. 38, p. 70–74, 2017. ISSN 1068-5200. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520016301316>>.

OTHONOS, A.; KALLI, K. *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Boston: Artech House Publishers, 1999. 433 p. ISBN 9780890063446.

- OTHONOS, A. et al. Fibre Bragg Gratings. In: VENGHAUS, H. (Ed.). *Wavelength Filters in Fibre Optics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006. p. 189–269. ISBN 978-3-540-31770-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/3-540-31770-8_6>.
- PALAI, G.; DHIR, T. K. Optik Theoretical model for measurement of hemoglobin in human blood using 3D photonic crystal structure. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, Elsevier GmbH., v. 126, n. 4, p. 478–482, 2015. ISSN 0030-4026. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.11.003>>.
- PREBLE, S. F.; LIPSON, H.; LIPSON, M. F. Novel two-dimensional photonic crystals designed by evolutionary algorithms. In: LIPSON, M. F. et al. (Ed.). [s.n.], 2004. p. 118. Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.570841>>.
- PUZZO, D. et al. Color from colorless nanomaterials: Bragg reflectors made of nanoparticles. *Journal of Materials Chemistry - J MATER CHEM*, v. 19, 2009.
- RAYLEIGH, L. XVII. On the maintenance of vibrations by forces of double frequency, and on the propagation of waves through a medium endowed with a periodic structure. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, v. 24, n. 147, p. 145–159, aug 1887. ISSN 1941-5982. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14786448708628074>>.
- REDEL, E. et al. Nanoparticle Films and Photonic Crystal Multilayers from Colloidally Stable, Size-Controllable Zinc and Iron Oxide Nanoparticles. *ACS nano*, v. 5, p. 2861–2869, 2011.
- RUSSELL, P.; ARCHAMBAULT, J.-L.; REEKIE, L. Fibre gratings. *Phys. World*, v. 6, p. 41–46, 1993.
- SALEH, B. E.; TEICH, M. C. *FUNDAMENTALS OF PHOTONICS*. 2. ed. New Jersey, EUA: Wiley, 2007.
- SANCHEZ-SOBRADO, O. et al. Interplay of resonant cavity modes with localized surface plasmons: optical absorption properties of Bragg stacks integrating gold nanoparticles. *Advanced materials*, v. 23 18, p. 2108–2112, 2011.
- SANTIAGO, F. A. L. et al. Propagation of electromagnetic waves on quasiperiodic rare-earth multilayers. *Optical Materials*, v. 114, p. 111003, 2021. ISSN 0925-3467. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925346721002044>>.
- SEGUNDO, M. T.; SILVA, J. P. da. Aplicação do VBPM na Análise de um Guia de Onda Segmentado Quase Periódico. In: *MOMAG 2018*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 821–825.
- SEGUNDO, M. T. A. B.; SILVA, J. P. da. A study of a silicon quasi-periodic segmented waveguide. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 22, p. 268–279, 6 2023. ISSN 2179-1074. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2179-10742023000200268&lng=en>.
- SHECHTMAN, D. et al. Metallic Phase with Long-Range Orientational Order and No Translational Symmetry. *Physical Review Letters*, v. 53, n. 20, p. 1951–1953, nov 1984. ISSN 0031-9007. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.53.1951>>.
- SHEN, H. et al. One Dimensional Photonic Crystals: Fabrication, Responsiveness and Emerging Applications in 3D Construction. *RSC Adv.*, v. 6, 2015.

- SHUKLA, M. K.; DAS, R. Tamm-plasmon polaritons in one-dimensional photonic quasi-crystals. *Opt. Lett.*, OSA, v. 43, n. 3, p. 362–365, 2018. Disponível em: <<http://www.osapublishing.org/ol/abstract.cfm?URI=ol-43-3-362>>.
- SILVA, J. P. da; SANTOS, E. G. dos; SEGUNDO, M. T. B. Directional Coupler Based on a Photonic Quasi-Crystal Fiber with Extended Cores. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 17, n. 2, p. 201–207, 2018.
- SINGH, B. K.; PANDEY, P. C. Effect of temperature on terahertz photonic and omnidirectional band gaps in one-dimensional quasi-periodic photonic crystals composed of semiconductor InSb. *Appl. Opt.*, OSA, v. 55, n. 21, p. 5684–5692, jul 2016. Disponível em: <<http://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-55-21-5684>>.
- SWAIN, K. P.; PALAI, G. Optik Estimation of human-hemoglobin using honeycomb structure : An application of photonic crystal. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, Elsevier GmbH., v. 127, n. 6, p. 3333–3336, 2016. ISSN 0030-4026. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.12.081>>.
- THIEL, M.; FLACHENECKER, G.; SCHADE, W. Femtosecond laser writing of Bragg grating waveguide bundles in bulk glass. *Optics Letters*, v. 40, n. 7, p. 1266, apr 2015. ISSN 0146-9592. Disponível em: <<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ol-40-7-1266>>.
- TRABELSI, Y. et al. Microwave transmission through one-dimensional hybrid quasi-regular (fibonacci and thue-morse)/periodic structures. *Photonic Sensors*, v. 3, p. 246–255, 2013. ISSN 16749251.
- VALLIAMMAI, M.; SIVABALAN, S. Wide-band supercontinuum generation in mid-IR using polarization maintaining chalcogenide photonic quasi-crystal fiber. *Applied Optics*, v. 56, n. 16, p. 4797, 2017. ISSN 0003-6935.
- VASCONCELOS, M. S.; ALBUQUERQUE, E. L.; MARIZ, A. M. Optical localization in quasi-periodic multilayers. *Journal of Physics Condensed Matter*, v. 10, n. 26, p. 5839–5849, 1998. ISSN 09538984.
- VASCONCELOS, M. S.; COTTAM, M. G. Surface and bulk plasmon-polaritons in semiconductor photonic crystals with embedded graphene sheets. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, v. 52, n. 28, p. 285104, may 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab198d>>.
- WANG, C. et al. Experimental and numerical simulation investigation on vortex- induced vibration test system based on bare fiber Bragg grating sensor technology for vertical riser. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Elsevier Ltd, v. 13, p. 223–235, 2021. ISSN 2092-6782. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2021.02.002>>.
- WANG, Z. et al. Bioinspired Water□Vapor□Responsive Organic/Inorganic Hybrid One□Dimensional Photonic Crystals with Tunable Full□Color Stop Band. *Advanced Functional Materials*, v. 20, p. 3784–3790, 2010.
- XIAO, Y. et al. 1-kilowatt CW all-fiber laser oscillator pumped with wavelength-beam-combined diode stacks. v. 20, n. 3, p. 3296–3301, 2012.
- YABLONOVITCH, E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. *Physical Review Letters*, v. 58, n. 20, p. 2059–2062, may 1987. ISSN 0031-9007. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.58.2059>>.

YE, X. et al. Facile synthesis of ZnS nanobowl arrays and their applications as 2D photonic crystal sensors. v. 1, n. 38, 2013.

ZHAO, X. et al. A Fiber Bragg Grating acceleration sensor with temperature compensation. *Optik*, v. 241, n. February, 2021. ISSN 00304026.