



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LÉO CÉSAR PARENTE DE ALMEIDA

**ANÁLISE NUMÉRICA DE ESTRUTURAS PLANARES
BASEADAS EM CRISTAIS FOTÔNICOS PARA
APLICAÇÕES EM CIRCUITOS INTEGRADOS**

TD 01 / 2025

UFPA / ITEC / PPGE
Campus Universitário do Guamá
Belém – Pará – Brasil
2025

LÉO CÉSAR PARENTE DE ALMEIDA

**ANÁLISE NUMÉRICA DE ESTRUTURAS PLANARES
BASEADAS EM CRISTAIS FOTÔNICOS PARA
APLICAÇÕES EM CIRCUITOS INTEGRADOS**

Tese submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA como requisito parcial para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica na área de Telecomunicações.
Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Orientador: Prof. Dr. Marcos Benedito Caldas Costa

TD 01 / 2025

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém – Pará – Brasil
2025

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

A447a Almeida, Léo César Parente de.
Análise numérica de estruturas planares baseadas em cristais
fotônicos para aplicações em circuitos integrados / Léo César
Parente de Almeida. — 2025.
120 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcos Benedito Caldas Costa
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,
Belém, 2025.

1. porta lógica totalmente óptica. 2. roteador de
comprimento de onda. 3. expansão em ondas planas. 4.
diferenças finitas no domínio do tempo. 5. grafeno. I. Título.

CDD 384



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“ANÁLISE NUMÉRICA DE ESTRUTURAS PLANARES BASEADAS EM CRISTAIS FOTÔNICOS PARA APLICAÇÕES EM CIRCUITOS INTEGRADOS”

AUTOR: LÉO CÉSAR PARENTE DE ALMEIDA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM: 10/02/2025

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcos Benedito Caldas Costa
(Orientador – PPGEE/ITEC/UFPA)

Prof. Dr. Karlo Queiroz da Costa
(Avaliador Interno - PPGEE/ITEC/UFPA)

Prof. Dr. Rômulo Luiz Oliveira da Silva
(Avaliador Externo ao Programa - UFPA/ANANINDEUA)

Prof. Dr. Fábio Barros de Sousa
(Avaliador Externo - UNIFESSPA)

Prof. Dr. Lélis Araújo de Oliveira
(Avaliador Externo - IFPA)

VISTO:

Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

Dedico a Deus e à minha Família.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus.

Agradeço a minha família, que apesar da distância, sempre esteve ao meu lado. Pelo incondicional apoio, por tudo! À Christiane, por sua dedicação e fundamental apoio durante o curso e em todos os momentos. Dedico este trabalho a vocês. Amo vocês!

Ao professor Marcos Benedito Caldas Costa, por toda a orientação e suporte neste trabalho. Muito obrigado!

Aos professores Karlo Queiroz da Costa, Rômulo Luiz Oliveira da Silva, Lelis Araújo de Oliveira e Fabio Barros de Sousa, que participaram como avaliadores na banca de defesa deste trabalho, pelas leituras e contribuições. Muito Obrigado!

Finalmente, agradeço a todos os professores e colegas do PPGEE que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação e realização deste trabalho.

“O livro da natureza foi escrito exclusivamente com figuras e símbolos matemáticos.”
(Galileu Galilei)

Resumo

Neste trabalho, utilizou-se o conceito de cristais fotônicos bidimensionais para o *design*, as simulações numéricas e para a análise das estruturas planares propostas para aplicações em circuitos integrados fotônicos. Os dispositivos propostos consistem em: uma porta lógica totalmente óptica (NAND gate), além dos dois roteadores de comprimento de onda baseados em grafeno, do tipo 2×2 ($2 \times 2 \lambda$ -router) e 4×4 ($4 \times 4 \lambda$ -router). Estas estruturas totalmente ópticas são compostas por anéis ressoadores de cristais fotônicos, constituídos de hastes dielétricas de silício em ar. O método da expansão em ondas planas e o método das diferenças finitas no domínio do tempo são utilizados para analisar as estruturas. O método da expansão em ondas planas é utilizado para calcular o intervalo de banda fotônica para as estruturas, que é de $0,320267-0,3924 (a/\lambda)$ para a porta lógica totalmente óptica, e de $0,330944-0,396419 (a/\lambda)$ para os roteadores totalmente ópticos. As duas estruturas periódicas propostas são implementadas utilizando-se de comprimentos de onda operacionais abrangendo as bandas C, L e U. A *performance* das estruturas propostas é analisada por meio dos seguintes parâmetros: *footprint*, potência de saída, razão de contraste, perda de inserção, fator de qualidade, tempo de resposta, taxa de *bits* e diafonia. Os resultados numéricos das simulações evidenciam que as estruturas propostas são adequadas para a concepção de circuitos ópticos digitais ultrarrápidos, apresentando uma alta potência de transmissão, um consumo de energia reduzido, um claro princípio de funcionamento e um simples *design*. Além do mais, as estruturas propostas possuem um tamanho menor quando comparadas com outras estruturas, apresentando um *footprint* de cerca de $119,58 \mu\text{m}^2$, contribuindo assim para aumentar a densidade de integração de componentes miniaturizados e de alto desempenho para diversas aplicações em circuitos integrados fotônicos.

Palavras-chave: porta lógica totalmente óptica; roteador de comprimento de onda; expansão em ondas planas; diferenças finitas no domínio do tempo; grafeno.

Abstract

In this work, the concept of two-dimensional photonic crystals was used for the design, numerical simulations and analysis of the proposed planar structures for applications in photonic integrated circuits. The proposed devices consist of: an all-optical logic gate (NAND gate), in addition to two graphene-based wavelength routers, of the type 2×2 ($2 \times 2 \lambda$ -router) and 4×4 ($4 \times 4 \lambda$ -router). These all-optical structures are composed of photonic crystal ring resonators, consisting of silicon dielectric rods in air. The plane wave expansion method and the finite-difference time-domain method are used to analyze the structures. The plane wave expansion method is used to calculate the photonic band gap for the structures, which is $0.320267-0.3924 (a/\lambda)$ for the all-optical logic gate, and $0.330944-0.396419 (a/\lambda)$ for the all-optical routers. The two proposed periodic structures are implemented using operating wavelengths spanning the C, L and U bands. The performance of the proposed structures is analyzed by means of the following parameters: footprint, output power, contrast ratio, insertion loss, quality factor, response time, bit rate and crosstalk. The numerical results of the simulations show that the proposed structures are suitable for the design of ultrafast digital optical circuits, featuring high transmission power, low power consumption, a clear operating principle and a simple design. Furthermore, the proposed structures have a smaller size when compared to other structures, presenting a footprint of approximately $119.58 \mu\text{m}^2$, thus contributing to increase the integration density of miniaturized and high-performance components for various applications in photonic integrated circuits.

Keywords: all-optical logic gate; wavelength router; plane wave expansion; finite-difference time-domain; graphene.

Lista de ilustrações

Figura 1.	Borboleta do gênero <i>Morpho</i> e a imagem ampliada da microestrutura de sua asa, observada por meio de um microscópio eletrônico.	28
Figura 2.	Ilustração do cristal fotônico 3D desenvolvido por Eli Yablonovitch. . .	28
Figura 3.	Cristal fotônico bidimensional formado pela distribuição periódica de: (a) hastes dielétricas em um substrato de ar; (b) colunas de ar perfuradas em um substrato dielétrico.	30
Figura 4.	Ilustração do cristal fotônico periódico em (a) uma direção, (b) duas direções e (c) três direções. As cores diferentes correspondem aos dois materiais diferentes, com as constantes dielétricas diferentes ϵ_1 e ϵ_2 . . .	30
Figura 5.	Cristal fotônico 2D, onde ‘ <i>a</i> ’ e ‘ <i>r</i> ’ são os parâmetros projetivos da estrutura.	31
Figura 6.	Ilustração de guias de onda baseados em cristal fotônico 2D, projetados utilizando uma rede quadrada de hastes dielétricas: (a) em linha reta; (b) com dobramento de 90 graus.	33
Figura 7.	(a) Cristal fotônico do tipo <i>slab</i> baseado em uma rede periódica quadrada de hastes dielétricas; (b) Propagação do campo eletromagnético no guia de onda com defeito de linha de raio reduzido; (c) Cristal fotônico do tipo <i>slab</i> em uma rede triangular de furos em ar.	34
Figura 8.	Cavidade ressonante baseada em cristal fotônico bidimensional formada por um defeito pontual.	36
Figura 9.	Detalhes de uma estrutura baseada em um cristal fotônico bidimensional com um PhCRR acoplado aos guias de onda horizontais (guia de ondas superior e inferior), e contraste de índices de refração alto/baixo, ou seja, hastes/ar = 3,9/1. O <i>design</i> da estrutura foi feito utilizando-se do <i>software</i> OptiFDTD, disponível em https://optiwave.com	37
Figura 10.	Alguns alótropos de carbono de várias dimensões, materiais da família do carbono: (a) <i>Bulky ball</i> (0D); (b) Nanotubo de carbono (1D); (c) Grafite (3D) [77].	39
Figura 11.	Símbolo e equação Booleana para a porta lógica AND.	44
Figura 12.	Símbolo e equação Booleana para a porta lógica OR.	45
Figura 13.	Símbolo e equação Booleana para a porta lógica NOT.	45
Figura 14.	Símbolo e equação Booleana para a porta lógica NAND.	46
Figura 15.	Símbolo e equação Booleana para a porta lógica NOR.	47
Figura 16.	Símbolo e equação Booleana para a porta lógica XOR.	48
Figura 17.	Símbolo e equação Booleana para a porta lógica NXOR.	49

Figura 18.	PSE, estrutura e roteamento: (a) PSE 2×2 ; (b) Estado OFF: os caminhos ópticos para os comprimentos de onda que não estão em ressonância com os dois PhCRRs, em um cruzamento de guias de onda passivo; (c) Estado ON: os caminhos ópticos para os comprimentos de onda em ressonância com os PhCRRs, isto é, a luz é acoplada aos PhCRRs e compelida a girar. As cores (azul e vermelha) nas Figuras 18 (a), (b) e (c) indicam os comprimentos de onda utilizados na estrutura.	55
Figura 19.	Estrutura do roteador GWOR do tipo 4×4 formado por 4 PSEs do tipo 2×2 . As cores vermelha e azul indicam os comprimentos de onda λ_1 e λ_2 .	57
Figura 20.	Estrutura fundamental de rede quadrada projetada.	65
Figura 21.	As Figuras (a) e (b) representam a estrutura de banda para uma rede quadrada de hastes dielétricas de alumina, com raio das hastes $r = 0,2a$. Na Figura (a), os modos TE e TM são exibidos com configuração de polarização híbrida, mas sem a distinção dos modos. A Figura (b) foi retirada da referência [1].	65
Figura 22.	Diagrama esquemático do dispositivo proposto, com a funcionalidade de uma porta lógica NAND totalmente óptica.	67
Figura 23.	Esquema de simulação para a estrutura totalmente óptica com funcionalidade NAND. Observa-se as entradas de sinais A e B , além da saída D .	67
Figura 24.	Definição dos níveis lógicos ‘0’ e ‘1’ com os correspondentes valores de potência na saída.	69
Figura 25.	Diagrama de bandas da estrutura totalmente óptica proposta.	72
Figura 26.	Curva para a razão de contraste da porta lógica NAND proposta.	73
Figura 27.	Padrão vetorial de Poynting da funcionalidade NAND no comprimento de onda operacional de 1700 nm e a simulação da distribuição do campo elétrico E_y na estrutura 2D, baseada em cristais fotônicos, para os casos (a) $0 - 0$; (b) $0 - 1$; (c) $1 - 0$ e (d) $1 - 1$.	75
Figura 28.	Curvas para o nível de potência transmitido na porta de saída D , quando na porta C é aplicada a fonte óptica de bombeamento para as diferentes combinações de entrada, isto é, para os casos (a) $0 - 0$; (b) $0 - 1$; (c) $1 - 0$ e (d) $1 - 1$.	76
Figura 29.	Curva para o tempo de resposta para a porta lógica NAND.	78
Figura 30.	Rede quadrada com hastes de silício ($\epsilon_r = 12$, $r = 0,2a$, $a = 0,5943 \mu\text{m}$) em ar, sem defeitos, utilizada para o <i>design</i> do roteador 2×2 proposto.	82
Figura 31.	Cristal fotônico com grafeno: vista superior da parte central da estrutura com 12 hastes dielétricas dopadas com grafeno.	83

Figura 32.	Esquema de simulação do roteador 2×2 formado por dois PhCRRs. O sinal óptico lançado na porta P_1 é transmitido na porta P_2 (receptor) se o seu comprimento de onda for coincidente com uma das ressonâncias do PhCRR (por exemplo, λ_1), enquanto todos os outros comprimentos de onda (por exemplo, $\lambda_2, \lambda_3, \dots$) são transmitidos na porta P_3	83
Figura 33.	(a) Estrutura básica ou bloco construtivo composicional, roteador 2×2 composto por dois PhCRRs e suas partes constituintes: (b) os dois guias de onda ortogonais de cristais fotônicos obtidos por meio da criação de sucessivos defeitos pontuais, com cruzamento na parte central da estrutura; e (c) o PhCRR em detalhes, obtido em uma rede quadrada com hastes internas de silício com raio r	85
Figura 34.	Esquema de simulação para o roteador 2×2 com dois PhCRRs. O sinal óptico lançado na porta P_3 é transmitido para a porta P_4 (receptor) se o seu comprimento de onda for coincidente com uma das ressonâncias do PhCRR (por exemplo, λ_1), enquanto todos os outros comprimentos de onda (por exemplo, $\lambda_2, \lambda_3, \dots$) são transmitidos na porta P_1	86
Figura 35.	Diagrama de banda em rede quadrada de hastes de silício em ar para o modo TE.	87
Figura 36.	Definição dos estados de transmissão com os correspondentes valores de potência na saída das estruturas.	89
Figura 37.	Fator de qualidade em função do comprimento de onda, conforme a variação da medida do raio das hastes internas dos PhCRRs, para o modo TE.	90
Figura 38.	Operação básica de um PhCRR de acordo com a condição de ressonância.	91
Figura 39.	Espectros de transmitância e curvas dos níveis de potência transmitida nas portas P_2, P_3 e P_4 (O, N e L) quando o sinal óptico é acionado na porta P_1 (S) no comprimento de onda $\lambda_1 = 1,7 \mu\text{m}$: (a) estrutura 2×2 e simulação da distribuição do campo elétrico E_y ; (b) espectros de transmissão para o roteador 2×2 quando $r_1 = r = 0,2a$; (c) nível de potência óptica transmitida nas portas quando o sinal na porta P_1 está no estado ON; (d) espectros de transmissão nas portas P_1 e P_2 ; (e) nível de potência óptica transmitida nas portas P_1 e P_2	93

Figura 40.	Espectros de transmitância e curvas dos níveis de potência transmitida nas portas P_2 , P_3 e P_4 (O, N e L) quando o sinal óptico é acionado na porta P_1 (S) no comprimento de onda $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$: (a) estrutura 2×2 e simulação da distribuição do campo elétrico E_y ; (b) espectros de transmissão para o roteador 2×2 quando $r_1 = r = 0,2a$ (c) nível de potência óptica transmitida nas portas quando o sinal na porta P_1 está no estado OFF; (d) espectros de transmissão nas portas P_1 e P_3 ; (e) nível de potência óptica transmitida nas portas P_1 e P_3	94
Figura 41.	Espectros de transmitância e curvas dos níveis de potência transmitida nas portas P_2 , P_3 e P_4 (O, N e L) quando o sinal óptico é acionado na porta P_1 (S) no comprimento de onda $\lambda_2 = 1,721 \mu\text{m}$: (a) estrutura 2×2 e simulação da distribuição do campo elétrico E_y ; (b) espectros de transmissão de sinal do roteador 2×2 quando $r_2 = 0,24a$ (c) nível de potência óptica transmitida nas portas quando o sinal na porta P_1 está no estado ON; (d) espectros de transmissão nas portas P_1 e P_2 ; (e) nível de potência óptica transmitida nas portas P_1 e P_2	95
Figura 42.	Espectros de transmitância e curvas dos níveis de potência transmitida nas portas P_2 , P_3 e P_4 (O, N e L) quando o sinal óptico é acionado na porta P_1 (S) no comprimento de onda $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$: (a) estrutura 2×2 e simulação da distribuição do campo elétrico E_y ; (b) espectros de transmissão de sinal do roteador 2×2 quando $r_2 = 0,24a$ (c) nível de potência óptica transmitida nas portas quando o sinal na porta P_1 está no estado OFF; (d) espectros de transmissão nas portas P_1 e P_3 ; (e) nível de potência óptica transmitida nas portas P_1 e P_3	96
Figura 43.	<i>Design</i> da estrutura de composição GWOR (4×4 PhCRR <i>router</i>), composta por quatro estruturas básicas 2×2 , formando 12 pares de entrada-saída possíveis.	99
Figura 44.	Simulação da distribuição do campo elétrico E_y na estrutura 4×4 baseada em cristais fotônicos, quando o sinal óptico é acionado na porta P_2 (O), para os casos (a) λ_1 , r_1 ; (b) λ_2 , r_2 e (c) λ_3	100

Lista de tabelas

Tabela 1.	Tabela verdade para a porta lógica AND	44
Tabela 2.	Tabela verdade para a porta lógica OR	45
Tabela 3.	Tabela verdade para a porta lógica NOT	46
Tabela 4.	Tabela verdade para a porta lógica NAND	46
Tabela 5.	Tabela verdade para a porta lógica NOR	47
Tabela 6.	Tabela verdade para a porta lógica XOR	48
Tabela 7.	Tabela verdade para a porta lógica NXOR	49
Tabela 8.	Resumo dos parâmetros utilizados durante o <i>design</i> das estruturas . . .	68
Tabela 9.	Resumo dos parâmetros de simulação utilizados para a porta lógica NAND.	74
Tabela 10.	Combinações possíveis para as entradas e seus valores de fase	74
Tabela 11.	Resumo dos parâmetros de desempenho e comparação com algumas portas lógicas NAND baseadas em cristais fotônicos 2D	78
Tabela 12.	Resumo dos comprimentos de onda ressonantes e raios das hastes internas correspondentes para a estrutura 2×2	90
Tabela 13.	Todos os <i>links</i> esperados para a estrutura 2×2 , para o caso $r_i = r_1$. . .	98
Tabela 14.	Resumo dos resultados simulados para a estrutura básica 2×2	99
Tabela 15.	Todos os <i>links</i> esperados para a estrutura GWOR 4×4	102
Tabela 16.	Resumo dos resultados simulados para a estrutura GWOR 4×4	102

Lista de abreviaturas e siglas

AOLGs	<i>All-Optical Logic Gates</i>
BZ	<i>Brillouin Zone</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>
CW	<i>Continuous Wave</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
EM	<i>Electromagnetic Waves</i>
EMR	<i>Electromagnetic Radiation</i>
FDTD	<i>Finite-Difference Time-Domain</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum</i>
GVD	<i>Group Velocity Dispersion</i>
GWOR	<i>Generic Wavelength-Routed Optical Router</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ICs	<i>Integrated Circuits</i>
IRS	<i>Intrapulse Raman Scattering</i>
KHz	<i>Kilohertz</i>
MZI	<i>Mach-Zhender Interferometer</i>
MMI	<i>Multi-Mode Interference</i>
NoCs	<i>Networks-on-Chip</i>
NODC	<i>Nonlinear Optical Directional Coupler</i>
NLDC	<i>Non-Linear Directional Coupler</i>
ONoCs	<i>Optical Networks-on-Chip</i>

OREs	<i>Optical Routing Elements</i>
PPLN	<i>Periodically Poled Lithium Niobate</i>
PhCs	<i>Photonic Crystals</i>
PCFs	<i>Photonic Crystal Fibers</i>
PhCRRs	<i>Photonic Crystal Ring Resonators</i>
PhCSs	<i>Photonic Crystals Slabs</i>
PICs	<i>Photonic Integrated Circuits</i>
PSEs	<i>Photonic Switching Elements</i>
PBG	<i>Photonic Band Gap</i>
PWE	<i>Plane Wave Expansion</i>
PAM	<i>Pulse Amplitude Modulation</i>
<i>Si</i>	<i>Silicon</i>
SC	<i>Self-Collimation</i>
SPM	<i>Self-Phase Modulation</i>
SOA	<i>Semiconductor Optical Amplifiers</i>
SOI	<i>Silicon-On-Insulator</i>
SLG	<i>Single-Layer Graphene</i>
SoC	<i>System on Chip</i>
THz	<i>Terahertz</i>
TIR	<i>Total Internal Reflection</i>
TMM	<i>Transfer Matrix Method</i>
TE	<i>Transverse Electric</i>
TM	<i>Transverse Magnetic</i>
WRONoC	<i>Wavelength-Routed Optical Network-on-Chip</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Contexto e Motivação	19
1.2	Trabalhos Correlatos	21
1.3	Objetivos	22
1.4	Organização da Tese	23
2	CRISTAIS FOTÔNICOS E GRAFENO	25
2.1	Breve Histórico sobre os Cristais Fotônicos	26
2.2	Tipos de Cristais Fotônicos	29
2.2.1	Cristais Fotônicos Bidimensionais	31
2.3	Tipos de Defeitos	31
2.4	Tipos de Estruturas Baseadas em Cristais Fotônicos	32
2.4.1	Guias de Onda	32
2.4.2	Fitas de Cristal Fotônico	34
2.4.3	Ressonadores Ópticos	36
2.5	Grafeno	38
3	PORTAS LÓGICAS E ROTEADORES	41
3.1	Portas Lógicas Totalmente Ópticas	42
3.1.1	Porta Lógica E (AND <i>Logic Gate</i>)	44
3.1.2	Porta Lógica OU (OR <i>Logic Gate</i>)	44
3.1.3	Porta Lógica NÃO ou INVERSORA (NOT <i>Logic Gate</i>)	45
3.1.4	Porta Lógica NÃO E (NAND <i>Logic Gate</i>)	46
3.1.5	Porta Lógica NÃO OU (NOR <i>Logic Gate</i>)	47
3.1.6	Porta Lógica OU EXCLUSIVO (XOR <i>Logic Gate</i>)	47
3.1.7	Porta Lógica NÃO OU EXCLUSIVO (NXOR <i>Logic Gate</i>)	48
3.2	Roteadores de Comprimento de Onda	49
3.2.1	<i>Design</i> de Redes Fotônicas	54
3.2.2	Elementos de Comutação Fotônica (PSEs)	54
3.2.3	Elementos de Roteamento Óptico (ORE)	55
3.2.4	Topologias Lógicas WRONoC	55
4	MÉTODOS NUMÉRICOS	58
4.1	As Equações de Maxwell	58
4.2	O Método PWE	61
4.3	O Método FDTD	62

4.4	Validação do <i>Software</i> Utilizado	64
5	PORTA LÓGICA TOTALMENTE ÓPTICA	66
5.1	<i>Design</i> , Materiais e Métodos	66
5.2	Análise da <i>Performance</i>	70
5.3	Resultados Numéricos	71
5.4	Conclusão	79
6	ROTEADORES DE COMPRIMENTO DE ONDA DE CRISTAIS FOTÔNICOS	80
6.1	<i>Design</i> , Materiais e Métodos	81
6.2	Obtenção dos Modos Ressonantes e Análise da <i>Performance</i>	85
6.3	Resultados Numéricos	90
6.3.1	Resultados Numéricos e Análise da Estrutura 2×2	91
6.3.2	Resultados Numéricos e Análise da Estrutura 4×4	99
6.4	Conclusão	102
7	CONCLUSÃO	104
7.1	Publicações	105
	REFERÊNCIAS	106
	APÊNDICES	118

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por novos materiais que possam controlar os sinais de luz em escala micrométrica tem sido uma tendência geral concernente ao desenvolvimento da óptica e da fotônica durante as últimas três décadas. Entre estes novos e promissores materiais, estão os cristais fotônicos (PhCs – *Photonic Crystals*), nanoestruturas compostas em que a constante dielétrica depende periodicamente das coordenadas espaciais. Cristais fotônicos podem exibir certas regiões com frequências para reflexão total, conhecidas como intervalos de bandas fotônicas. Além do mais, as propriedades ópticas dos cristais fotônicos (por exemplo, as posições espectrais dos intervalos de bandas) podem ser facilmente variadas dependendo de uma escolha adequada de sua geometria ou dos parâmetros construtivos.

Nesta tese, os cristais fotônicos bidimensionais (2D PhCs) são fundamentais, e são utilizados para propor, projetar e realizar a implementação de algumas estruturas planares totalmente ópticas baseadas em anéis ressoadores de cristais fotônicos ou PhCRRs (PhCRRs – *Photonic Crystal Ring Resonators*). As estruturas propostas são compostas por anéis ressoadores que são constituídos artificialmente com materiais apresentando diferentes índices de refração. De modo geral, esta tese apresenta resultados sobre alguns aspectos das propriedades e das aplicações inerentes aos cristais fotônicos bidimensionais.

Os cristais fotônicos estão organizados em padrões periódicos que possibilitam a manipulação da luz visível e também de outras formas de radiação eletromagnética, também conhecida pela sigla EMR (EMR – *Electromagnetic Radiation*) [1]. Devido às suas propriedades únicas, as estruturas baseadas em cristais fotônicos bidimensionais apresentam muitas vantagens quando comparadas com as estruturas ópticas convencionais, entre as quais, cita-se uma alta densidade de integração de componentes em circuitos integrados fotônicos (PICs – *Photonic Integrated Circuits*), além de estruturas com projetos simples, alta taxa de velocidade na transmissão da informação e alta taxa de confinamento.

Existem alguns comprimentos de onda que não se propagam através da estrutura fotônica, formando uma faixa de frequências conhecida como banda proibida da estrutura ou simplesmente pela sigla PBG (PBG – *Photonic Band Gap*). Desta maneira, as ondas eletromagnéticas incidentes com frequência localizada nesta faixa são refletidas pelo cristal, e, portanto, o fluxo de luz pode ser controlado [1], [2]. A ocorrência deste fenômeno é bastante aproveitada para o projeto e análise da maioria dos dispositivos fotônicos projetados, e que são baseados em cristais fotônicos bidimensionais. Entre alguns exemplos destes dispositivos, podemos citar os circuladores ópticos, os anéis ressoadores, as chaves ópticas (*switches*), acopladores direcionais, entre outras estruturas bastante estudadas e que podem ser facilmente encontradas na literatura.

1.1 Contexto e Motivação

Nos últimos anos, a demanda crescente por sistemas de processamento ultrarrápidos exigiu o desenvolvimento de dispositivos totalmente ópticos. Alcançar uma alta taxa de transferência de dados com a possibilidade de integração, está entre as questões mais importantes no *design* de sistemas totalmente ópticos, que permitem circuitos operando em uma frequência de terahertz. Neste sentido, diferentes abordagens foram utilizadas para obter dispositivos e componentes adequados para diversas aplicações, tais como detecção, processamento de sinais, computação, mas sobretudo em telecomunicações [3, 4, 5].

Uma abordagem possível para possibilitar a funcionalidade típica das portas lógicas em estruturas baseadas em cristais fotônicos, é por meio da utilização do princípio da interferência multimodal (MMI – *Multi-Mode Interference*), que ocorre nos guias de onda das estruturas. Em portas lógicas de cristais fotônicos baseadas no efeito MMI, os valores lógicos de entrada são determinados apenas pelas fases dos sinais acionados em cada porta de entrada, e podem ser alcançados utilizando-se os sinais BPSK (*Binary Phase Shift Keying*). Por sua vez, o valor lógico de saída é determinado pela amplitude do sinal na porta de saída, independentemente de sua fase. Portanto, quando os sinais são acionados nos guias de onda de entrada, com as suas fases adequadas, os modos guiados interferem destrutivamente ou construtivamente na região em que os sinais interagem no efeito MMI, para gerar um sinal na porta de saída que pode ser de lógica ‘0’, quando a interferência é destrutiva, ou de lógica ‘1’, no caso da interferência ser construtiva [6, 7, 8].

O efeito de autocolimação (SC – *Self-Collimation*) representa uma outra abordagem possível para projetar as portas lógicas funcionais baseadas em cristais fotônicos. O efeito de autocolimação é um fenômeno no qual um sinal de luz pode se propagar sem qualquer mudança significativa na forma do feixe, e independentemente dos diversos tipos de defeitos que podem ser inseridos ou projetados na estrutura. Geralmente, os projetos de dispositivos que utilizam o princípio dos feixes autocolimados, dependem do fenômeno conhecido como reflexão interna total (TIR – *Total Internal Reflection*), e as operações típicas das portas lógicas podem ser realizadas considerando-se as diferentes mudanças de fase que podem ocorrer entre os feixes incidentes nas entradas da estrutura periódica. Conseqüentemente, ocorrerá interferência destrutiva e/ou construtiva nas portas de saída das estruturas, resultando em sinais que podem ser de lógica ‘0’ ou de lógica ‘1’ [9, 10, 11].

Existem outras abordagens utilizadas para projetar portas lógicas em cristais fotônicos, por exemplo, por meio da mistura de quatro ondas (FWM – *Four-Wave Mixing*) [12], com amplificador óptico semiconductor (SOA – *Semiconductor Optical Amplifier*) [13–16], por meio de fibras de cristais fotônicos (PCF – *Photonic Crystal Fiber*) [17, 18, 19], por meio de espalhamento estimulado Raman (SRS – *Stimulated Raman Scattering*) [20], utilizando-se o interferômetro de Mach-Zehnder (MZI – *Mach-Zehnder Interferometer*) [21], entre outras abordagens [22], [23]. Todas estas abordagens apresentam limitações,

tais como, a sensibilidade da fase de entrada e o uso de estruturas complexas, que podem gerar desafios no processo de fabricação.

De fato, uma abordagem simples e eficiente foi proposta controlando o efeito da interferência entre os feixes de luz, por meio do caminho de interferência dos guias de onda das estruturas. Desta forma, o estado de alta transmissão, ou de lógica ‘1’, ocorre por meio de uma interferência construtiva entre os sinais nos guias de onda de entrada. Isto é conseguido projetando uma interseção com uma diferença de caminho de 0. Em caso contrário, ocorrerá uma interferência destrutiva na interseção entre os guias de onda de entrada, caracterizando assim um estado de transmissão baixo, ou de lógica ‘0’.

Utilizando a abordagem do caminho de interferência dos guias de onda, diversas portas lógicas baseadas em cristais fotônicos foram propostas [24–29]. No entanto, algumas desvantagens foram observadas durante a implementação destas estruturas, entre as quais, podemos citar a eventual perda de sinal nas portas de saída, alto valor de *crosstalk* obtido para as portas inativas e os diferentes valores de potência obtidos representando um mesmo estado lógico.

Os circuitos integrados fotônicos [30] representam uma tecnologia fundamental para o futuro das redes ópticas, na qual todos os componentes e dispositivos ópticos estão integrados para formar um único *chip* fotônico. Estes *chips* irão satisfazer as demandas de transmissão de dados em alta velocidade entre um número cada vez mais crescente de usuários.

Além do mais, estes circuitos integrados fotônicos miniaturizados com uma alta confiabilidade e uma alta velocidade de operação melhorarão muito as comunicações baseadas em ondas eletromagnéticas [31]. Isto pode implicar em roteamento de sinais entre diferentes portas nas redes de circuitos integrados com um melhor desempenho [32].

Os componentes baseados em cristais fotônicos bidimensionais, tais como os divisores [33], circuladores [34], filtros [35], codificadores de baixa potência [36], decodificadores [37] e roteadores [38], [39], foram projetados e relatados, representando alternativas à tecnologia convencional. Estes dispositivos foram relatados com um desempenho superior quando comparados aos dispositivos convencionais. Entre estes dispositivos, destaca-se os roteadores de comprimento de onda, para serem utilizados como blocos básicos de construção dos circuitos de comutação totalmente óptica, diferenciando-se dos roteadores convencionais, tanto nos aspectos de desempenho, quanto em relação à tecnologia utilizada no projeto das estruturas.

Os roteadores fotônicos destacam-se por desempenharem um papel essencial na transmissão de sinais de um usuário para outro, com baixas perdas e uma alta eficiência, com o intuito de fornecer sinais de alta qualidade aos usuários finais, além de minimizar o tráfego na transmissão de dados.

Além do mais, os roteadores apresentados neste trabalho, destacam-se por serem baseados em cristais fotônicos bidimensionais, marcando a mudança da tecnologia utilizada para o projeto das estruturas propostas.

De modo geral, os roteadores são dispositivos que roteiam o sinal acionado na porta de entrada para as diferentes portas de saída, baseando-se nos comprimentos de onda que constituem o sinal. Este mecanismo de roteamento é dependente dos comprimentos de onda ressonantes dos sinais que são acionados nas portas de entrada da estrutura. Os elementos de roteamento óptico (OREs – *Optical Routing Elements*) presentes ao longo dos caminhos de transmissão dos sinais determinam o mecanismo de roteamento. Mas especificamente, estes OREs são os anéis ressoadores (PhCRRs) que são posicionados adequadamente ao longo dos cruzamentos de guias de onda. De fato, cada PhCRR ressoa com um específico conjunto de comprimentos de onda [37], [38].

De forma geral, os roteadores de comprimento de onda baseados em cristal fotônico consistem em guias de onda retos e com cruzamento ortogonal, formados pela remoção de uma série de hastes dielétricas. Os anéis ressoadores são introduzidos nos roteadores para melhorar a sua seletividade em relação aos sinais acionados nas portas de entrada [39]. A diafonia e a perda de inserção são os parâmetros mais importantes que foram utilizados para analisar as estruturas propostas. A diafonia é um parâmetro essencial para a análise do desempenho dos roteadores, sendo a medida do nível de interferência que um guia de ondas causa em outro.

1.2 Trabalhos Correlatos

Ultimamente, os pesquisadores se interessaram pelo *design* de estruturas totalmente ópticas baseadas em cristais fotônicos, sendo um dos meios mais importantes para formar novos processadores ópticos e sistemas de comunicações ópticas. Alguns destes autores projetaram estruturas periódicas planares baseando-se em PhCRRs, em que estudaram as vantagens e desvantagens existentes em cada método utilizado.

Neste sentido, diversos trabalhos foram desenvolvidos, entre os quais, cita-se o trabalho em [12], onde foram projetadas algumas estruturas para a obtenção de portas lógicas totalmente ópticas (AOLGs – *All-Optical Logic Gates*) baseadas em cristal fotônico bidimensional, utilizando-se de interferência multimodal. Algumas AOLGs foram obtidas: OR, NAND, XNOR e XOR. As estruturas projetadas foram implementadas e analisadas numericamente utilizando-se principalmente dos métodos PWE (*Plane Wave Expansion*) e FDTD (*Finite-Difference Time-Domain*). Os valores obtidos para a razão de extinção para as portas OR e NAND foi de cerca de 26,6 dB e 25 dB, respectivamente, e para XNOR e XOR, cerca de 28,6 dB na Banda C (C-Band – *Conventional Band*), com uma região espectral de 1530 nm a 1565 nm. As AOLGs obtidas são adequadas para aplicações

em PICs, para serem utilizadas em processamento de sinais totalmente ópticos, em redes totalmente ópticas e em computação fotônica.

Em outro trabalho [40], os autores demonstraram a funcionalidade de uma estrutura utilizada para a obtenção de AOLGs. O princípio de funcionamento foi demonstrado por meio de simulações numéricas utilizando-se do método FDTD. A estrutura é aplicável para a faixa de frequências de 0,188–0,199 (a/λ), sendo que 0,194 (a/λ) é a frequência operacional utilizada nas simulações. A máxima razão de extinção obtida dentro da referida faixa de frequências é de 20,1 dB. Devido a sua simples estrutura e o seu claro princípio de funcionamento, a estrutura pode ser utilizada para futuras aplicações em PICs.

Na referência [41], os autores investigaram uma nova abordagem para a concepção de portas lógicas totalmente ópticas baseadas em cristais fotônicos 2D, utilizando uma rede quadrada de hastes de silício (Si) em sílica (SiO_2). A estrutura é constituída por dois PhCRRs e guias de onda cruzados, sem o uso de amplificadores ópticos e materiais não lineares. Em [41], a estrutura é implementada pelos métodos PWE e FDTD. Os resultados das simulações numéricas demonstram que a estrutura atua como porta lógica NOR e NAND. Os níveis lógicos, alto ‘1’ e baixo ‘0’ foram definidos. Considerando que a estrutura implementada é composta de material linear, apresenta baixo consumo de energia, sobretudo quando comparada com outras estruturas que utilizam materiais não lineares. Observa-se que o projeto de novas estruturas fotônicas significa novas aplicações para os anéis ressoadores em PICs ultracompactos.

Os trabalhos em [12, 40, 41] são alguns exemplos de estudos que se caracterizam pela utilização de uma metodologia numérica com a finalidade de analisar as estruturas projetadas para a utilização em diversas aplicações no âmbito das telecomunicações. Com este intuito, diversos trabalhos foram realizados sobre as aplicações das portas lógicas totalmente ópticas baseadas em cristais fotônicos 2D [6, 7, 9–15, 17–19, 21–23, 26–30, 17–19, 40, 41], e sobre os roteadores de comprimento de onda baseados em cristais fotônicos 2D [29, 31–33, 38, 39]. Além do mais, destaca-se que alguns destes autores projetaram estruturas de cristais fotônicos baseadas em ressoadores lineares ou não lineares, em que estudaram as vantagens e desvantagens de cada método utilizado.

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é analisar numericamente o desempenho de algumas estruturas totalmente ópticas baseadas em cristais fotônicos bidimensionais, para aplicações em ICs ultrarrápidos, utilizando-se de alguns parâmetros fundamentais, tais como: razão de contraste (CR – *Contrast Ratio*), perda de inserção (IL – *Insertion Loss*), fator de qualidade (Q -factor – *Quality Factor*), a diafonia ou Ct (Ct – *Crosstalk*), além do tempo de resposta (RT – *Response Time*) e a taxa de bits (BR – *Bit Rate*).

Em geral, o objetivo deste trabalho é projetar e analisar numericamente os seguintes dispositivos baseados em cristais fotônicos bidimensionais: uma chave óptica e os roteadores de comprimento de onda do tipo 2×2 e 4×4 . Os dispositivos propostos apresentam uma nova abordagem prática para os projetos, baseada em cristais fotônicos, a fim de contribuir com o desenvolvimento de sistemas lógicos e ICs em larga escala.

Mais especificamente, objetiva-se: (i) projetar e implementar numericamente uma porta lógica totalmente óptica que seja capaz de garantir a propagação de ondas e um forte confinamento do modo eletromagnético para a funcionalidade NAND, propondo assim uma abordagem para se obter representações de potência de sinais bem definidas para os estados lógicos, demonstrando o funcionamento de entrada e saída, com uma elevada velocidade de processamento de dados, e sob uma operação de baixas perdas de energia; (ii) projetar e analisar os roteadores de comprimento de onda como blocos básicos de construção para redes roteadoras de ordem superior; (iii) fazer a análise da *performance* das estruturas propostas por meio de alguns parâmetros fundamentais, tais como: razão de contraste, perda de inserção, fator de qualidade, diafonia, tempo de resposta e taxa de *bits*; (iv) Análise das estruturas propostas e proposição de dispositivos para serem utilizados em sistemas de comunicações ópticas.

1.4 Organização da Tese

Neste capítulo 1, é apresentado uma descrição breve e geral para o contexto atual da pesquisa em Óptica e Fotônica, por meio da descrição de alguns trabalhos das áreas, baseados em cristais fotônicos bidimensionais. Além do mais, é apresentado a motivação e o objetivo geral da tese, e também uma descrição sucinta sobre a estruturação do trabalho, tal como os conteúdos apresentados nos seus 7 capítulos.

No capítulo 2, é apresentada uma revisão de algumas ideias fundamentais sobre cristais fotônicos que serão fortemente utilizadas no decorrer do texto, com o intuito de desenvolvermos a teoria necessária e estabelecer a técnica apropriada para o projeto e as simulações numéricas para as estruturas fotônicas propostas. De modo complementar, apresenta-se um breve histórico sobre os cristais fotônicos, com alguns fatos considerados pioneiros para o desenvolvimento e evolução da área, tipos de cristais fotônicos, tipos de defeitos, de guias de onda e ressoadores. Por último, apresenta-se uma breve introdução sobre o grafeno, material utilizado no projeto dos roteadores de comprimento de onda.

No capítulo 3, será apresentada uma breve introdução sobre a teoria das portas lógicas, chaves roteadoras, e redes roteadas por comprimento de onda, em que abordaremos algumas definições importantes tais como, os dispositivos de chaveamento ultrarrápidos e o princípio de funcionamento das portas lógicas totalmente ópticas, que estão diretamente relacionadas com a análise da *performance* das estruturas simuladas.

No capítulo 4, é apresentado a modelagem matemática que descreve o comportamento e a propagação da luz nas estruturas, para um meio não condutor, linear, homogêneo e isotrópico. Além do mais, foi feita uma descrição dos principais métodos numéricos utilizados durante as simulações das estruturas fotônicas. Também apresentaremos algumas características do *software* utilizado para o *design* e simulação das estruturas propostas, além da sua validação numérica para algum resultado conhecido da literatura.

Nos capítulos 5 e 6, são apresentados os projetos, a descrição geral do funcionamento, e as simulações numéricas das estruturas que podem ser utilizadas em diversas aplicações em PICs. Neste trabalho, as estruturas propostas foram projetadas e utilizadas para a obtenção da porta lógica NAND, e também para a concepção do roteador de comprimento de onda 2×2 como um bloco básico de construção, para o projeto e a concepção de roteadores de comprimento de onda de ordem superior, do tipo $N \times N$. As propriedades mais importantes das estruturas foram analisadas por meio de inúmeras simulações numéricas baseadas principalmente nos métodos PWE e FDTD. Além do mais, nos capítulos 5 e 6 são apresentados os resultados das simulações numéricas, além de uma análise detalhada da *performance* das estruturas, utilizando-se vários parâmetros, entre os quais, o parâmetro principal, a razão de contraste, mas também a perda de inserção, o fator de qualidade, diafonia, o tempo de resposta e a taxa de *bits*.

Inicialmente, no capítulo 5, foi proposto um novo esquema para a implementação da porta lógica totalmente óptica NAND, sendo que a estrutura foi projetada e implementada no plano xz , em um *wafers* bastante compacto com dimensões de apenas $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$. Além do mais, a estrutura apresenta uma elevada razão de contraste, além de elevada *performance* quando se considera todos os parâmetros de análise, de modo que esta porta lógica mostrou-se bastante adequada para a integração em outros circuitos totalmente ópticos.

No capítulo 6, é apresentado um novo esquema para a implementação numérica de um roteador de comprimento de onda 2×2 , baseado em dois 2D PhCRRs, que é projetado e simulado no plano xz em um *wafers* com apenas $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$. O roteador totalmente óptico proposto, composto por dois PhCRRs acoplados com dois guias de onda cruzados, é utilizado para compor o roteador GWOR (*Generic Wavelength-Routed Optical Router*) do tipo 4×4 , sendo formado por quatro estruturas de composição do tipo 2×2 .

Finalmente, no capítulo 7, apresenta-se algumas considerações finais, além dos trabalhos aceitos e publicados em periódicos qualificados, até o momento de conclusão desta tese.

2 CRISTAIS FOTÔNICOS E GRAFENO

Neste capítulo será feita uma introdução de algumas ideias fundamentais sobre os cristais fotônicos. De fato, os estudos desenvolvidos sobre os cristais possibilitaram a compreensão das propriedades físicas da matéria sólida. Basicamente, podemos definir que um cristal é um arranjo periódico de átomos ou moléculas [42]. Ao longo dos últimos anos, constatamos o desenvolvimento de várias tecnologias baseadas em cristais fotônicos, nas mais diversas aplicações, sobretudo em telecomunicações.

Com o intuito de obter-se uma alta velocidade de computação e circuitos cada vez mais compactos, os pesquisadores se voltaram para fótons em vez de elétrons, uma vez que a luz apresenta vantagens sobre os elétrons, tais como, um alto confinamento e um baixo consumo de energia, que são condições adequadas para os circuitos integrados fotônicos [43]. A principal ideia que fundamenta e motiva os projetos baseados em cristais fotônicos, é o fato de que são materiais que podem ser projetados e construídos, a partir de uma geometria previamente definida que permite confinar e liberar fótons, possibilitando o controle do fluxo da luz [1]. Estas tecnologias podem ser utilizadas em diversos sistemas e aplicações.

Nesta tese, é dada atenção especial às aplicações em sistemas de comunicações ópticas. O mecanismo tradicional que é utilizado para a manipulação do fluxo de fótons é a reflexão interna total (TIR – *Total Internal Reflection*) [1], mas os cristais fotônicos fornecem um mecanismo totalmente diferente para o controle da luz, por meio do surgimento de uma faixa de frequências que não propagam no interior da estrutura e controla o fluxo de luz, devido à variação periódica da constante dielétrica na estrutura.

Um cristal fotônico representa uma nova categoria de material óptico em que a constante dielétrica muda periodicamente. O espaço em que esta constante dielétrica está inserida, é conhecido como estrutura de rede ou malha do cristal, e a distância entre dois cristais (ou entre duas hastes dielétricas) é a constante de rede da estrutura. Por sua vez, a propagação da luz ocorre no interior do cristal, então os fenômenos de refração e reflexão ocorrem em cada interface do material dielétrico. Assim, devido as interferências, alguns comprimentos de onda próximos da periodicidade da constante dielétrica não se propagam no interior da estrutura [2].

Analogamente com o que acontece com os cristais eletrônicos, em que a distribuição periódica de átomos ou moléculas pode criar uma banda proibida de energia inerente à propagação dos elétrons, um cristal fotônico constituído de regiões dielétricas que são periodicamente distribuídas em um meio, por sua vez pode criar uma banda proibida fotônica, em que a propagação de ondas eletromagnéticas em certas faixas de comprimentos

de onda são proibidas, formando assim a banda PBG (*Photonic Band Gap*) [44], [45], ou simplesmente a banda proibida da estrutura.

Com efeito, a banda PBG controla o fluxo de fótons [1, 2, 44, 45] de modo que este fluxo pode ser alterado convenientemente, desta forma permitindo inúmeras possibilidades de projetos baseados em cristais fotônicos para diversas aplicações em PICs, como projetos para a obtenção de portas lógicas ópticas e para os roteadores de comprimento de onda de ordem n , conforme demonstrados neste trabalho. Assim, neste conjunto de frequências proibidas, as ondas eletromagnéticas são fortemente atenuadas e não se propagam através da estrutura de rede, em quaisquer direções da estrutura.

Os cristais fotônicos são estruturas artificialmente fabricadas utilizando-se de materiais com banda proibida particular, diferentemente do que acontece com um material semiconductor, que ocorre naturalmente. Desta forma, os materiais com PBG definido possuem aplicações para diversos objetivos. Entre alguns exemplos destas aplicações, podemos citar os guias de onda, os ressoadores ópticos, chaves ópticas (*switches*) e os filtros PBG.

2.1 Breve Histórico sobre os Cristais Fotônicos

Os primeiros cristais fotônicos não foram projetados, mas evoluíram durante milhões de anos na natureza [46]. Como um exemplo, pode-se citar as opalas, que são minerais compostos por cristais de sílica [46], constituídos por microestruturas esféricas que são responsáveis pelo efeito iridescente. Entre outros exemplos de cristais fotônicos que podem ser encontrados na natureza, cita-se a formação de cores nas asas dos besouros e das borboletas, cujos efeitos observados são provenientes da difração da luz na rede periódica [47–52].

Basicamente, os cristais fotônicos podem ser definidos como sendo nanoestruturas que são formadas por materiais organizados periodicamente e com diferentes índices de refração, que possibilitam a manipulação da luz [1], [2]. Apesar de haverem outros materiais na natureza com tais características, os cristais fotônicos também podem ser concebidos artificialmente, podendo ser classificados como metamateriais [42], [53]. Na concepção desses materiais, as suas características (tais como o formato, as dimensões e os tipos de materiais que os compõem) são projetadas com o intuito de se conseguir o controle eficiente da luz.

No final do século XIX, John W. Strutt, mais conhecido como Lord Rayleigh, iniciou o estudo das propriedades eletromagnéticas de redes periódicas com a publicação de um trabalho em 1887 [54], sendo considerado como o primeiro cientista que investigou os cristais fotônicos unidimensionais (1D PhCs). No referido estudo, foi demonstrado que tais estruturas periódicas apresentam uma faixa de frequências proibidas, que ficou

conhecida como *Photonic Band Gap*, em que as ondas eletromagnéticas com frequências compreendidas neste *range* são proibidas de se propagarem através da estrutura, sendo completamente refletidas pelo cristal.

A invenção do laser na década de 60 [55], [56], um dispositivo que gera um feixe intenso de luz monocromática coerente (ou outro tipo de radiação eletromagnética) por meio de emissão estimulada de fótons de átomos ou moléculas excitadas, proporcionou uma revolução na área de telecomunicações. A partir desse advento e estímulo científico, houve um grande interesse no desenvolvimento de dispositivos capazes de controlar e manipular a luz.

Os cristais fotônicos, estruturas que permitem aos pesquisadores manipular a passagem da radiação eletromagnética, passaram de possibilidade teórica para realidade experimental ao longo de vários anos de avanços. No sentido destes avanços, foi em 1972, que V. P. Bykov [57] publicou um trabalho através do qual descreveu a possibilidade de estruturas periódicas serem utilizadas para o controle da emissão espontânea.

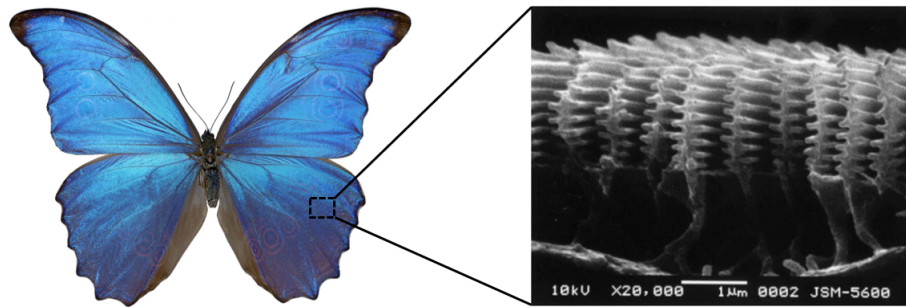
Entre outras contribuições mais recentes, em 1987, cerca de cem anos após a publicação do trabalho de Lord Rayleigh [54], destacam-se os trabalhos realizados por Sajeev John [58] e Eli Yablonovitch [59] sobre estruturas periódicas 2D e 3D, que ficaram conhecidas por cristais fotônicos. De forma independente, S. John e E. Yablonovitch trataram da possibilidade de estruturas periódicas serem utilizadas para o controle e a modificação da emissão espontânea, e a propagação da radiação eletromagnética.

As estruturas propostas por S. John e E. Yablonovitch, representam uma nova classe de materiais ópticos, que permitem controlar o fluxo de radiação eletromagnética ou modificar a interação luz-matéria. Além do mais, os referidos trabalhos foram precursores na utilização do Eletromagnetismo Clássico e da Física do Estado Sólido na análise das estruturas 2D e 3D.

Desde então, as palavras ‘cristal fotônico’ foram amplamente utilizadas para descrever as estruturas com bandas proibidas para ondas eletromagnéticas, e o número de trabalhos sobre os cristais fotônicos cresceu bastante ao longo dos anos, principalmente sobre diversas aplicações. Yablonovitch conseguiu modificar a emissão espontânea com o controle da propagação da radiação eletromagnética em estruturas periódicas dielétricas. Desde então, os pesquisadores têm usado materiais fotônicos para guiar a luz em dispositivos tais como as fibras ópticas.

Os pesquisadores também perceberam que os cristais fotônicos podem ser encontrados na natureza, por exemplo, nas escamas que dão às asas das borboletas suas cores iridescentes. O padrão observado na asa de borboleta e o seu jogo de arco-íris são causados pela reflexão da luz a partir da microestrutura de sua asa, como podemos observar na Figura 1.

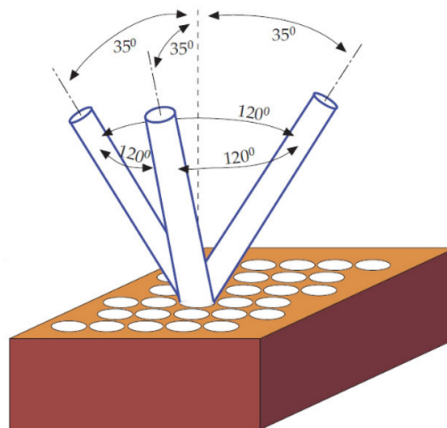
Figura 1. Borboleta do gênero *Morpho* e a imagem ampliada da microestrutura de sua asa, observada por meio de um microscópio eletrônico.



Fonte: Adaptado de [14].

Em 1991, Eli Yablonovitch publicou um importante artigo [60], no qual construiu um cristal fotônico tridimensional, com *band gap* situado na faixa 13–15 GHz. O referido cristal fotônico consiste em um bloco formado por um material com índice de refração igual a 3,6, apresentando perfurações milimétricas que foram produzidas mecanicamente. Este cristal ficou conhecido como “Yablonovite”, e ilustrado na Figura 2.

Figura 2. Ilustração do cristal fotônico 3D desenvolvido por Eli Yablonovitch.



Fonte: Adaptado de [1].

A partir das publicações de Eli Yablonovitch, diversos tipos de cristais fotônicos foram então desenvolvidos, e destinados para diversas aplicações. Um tempo depois, mais precisamente em 1990, foi publicado o primeiro trabalho teórico [44] de grande relevância para a comunidade científica. Neste referido trabalho, foi feito o cálculo da estrutura de banda para um cristal de rede cúbica e de face centrada, que demonstrou a existência de uma geometria cristalina com um PBG completo. De fato, a estrutura de bandas para este cristal foi calculada utilizando-se do método da expansão em ondas planas

(PWE), e consistiu basicamente em obedecer rigorosamente à natureza vetorial dos campos eletromagnéticos.

Em 1996, Thomas Krauss implementou um cristal fotônico bidimensional operando no comprimento de onda óptico [61]. Existem inúmeros trabalhos resultantes de pesquisas que ocorreram em muitos países com o intuito de melhorar o processamento óptico, para a utilização de estruturas de cristais fotônicos em diversas aplicações.

Ainda no ano de 1996, Philip Russell publicou um trabalho no qual desenvolveu a primeira fibra de cristal fotônico (PCF – *Photonic Crystal Fiber*) utilizada comercialmente [62, 63, 64]. Trata-se de uma classe especial de componentes incorporando cristais fotônicos, que foi proposta por meio da construção de fibras ópticas de sílica pura com uma microestrutura composta de centenas de furos em arranjo hexagonal, que ao longo de seu comprimento estão preenchidos com ar. Estas fibras de cristal fotônico, ou simplesmente PCFs, constituem uma nova classe de fibras ópticas.

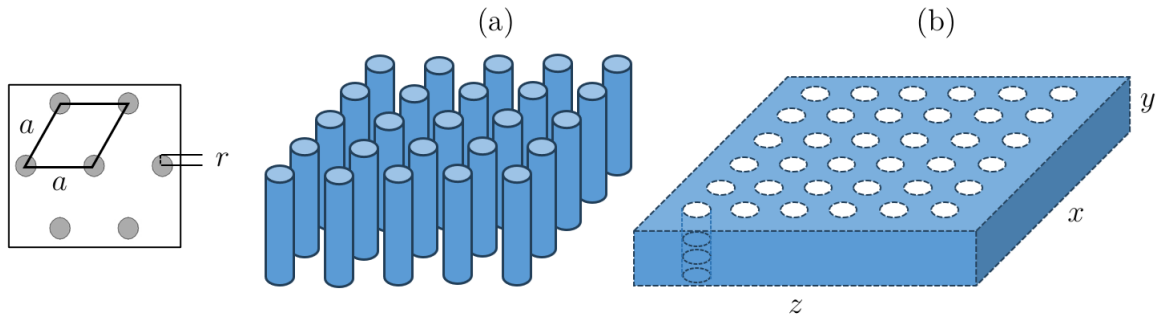
2.2 Tipos de Cristais Fotônicos

Os cristais fotônicos podem ser classificados em três tipos, conforme a sua geometria [1]: unidimensionais (1D), bidimensionais (2D) ou tridimensionais (3D). Considerando a estrutura de cristal 1D, a constante dielétrica muda apenas em uma direção, sendo que a banda proibida só existe nesta direção. Esta estrutura é mais simples, e, portanto, mais fácil de fabricar.

Em um cristal fotônico bidimensional, a constante dielétrica é periodicamente alterada ao longo de duas direções, mas é uniforme na terceira direção. Um cristal fotônico 2D pode ser formado, por exemplo, pela distribuição periódica de hastes dielétricas em um substrato de ar, ou também pela distribuição periódica de colunas de ar em um substrato dielétrico, como pode ser observado na Figura 3.

Se a banda PBG existir no plano de periodicidade, então a luz não se propaga neste plano [61]. A condição para entender os cristais fotônicos em duas dimensões é perceber que os campos neste plano podem ser divididos em dois modos de polarizações independentes por simetria: o modo TE (*transverse electric*), em que o campo elétrico está no plano xz , e o campo magnético é perpendicular (y); o modo TM (*transverse magnetic*), em que o campo magnético está no plano xz , e o campo elétrico é perpendicular (y). Cada polarização tem as suas próprias estruturas de banda diferentes. Desta maneira, correspondendo às polarizações, existem duas topologias básicas possíveis para os cristais fotônicos bidimensionais, conforme representado na Figura 3, ou seja, (a) hastes de alto índice de refração cercadas por um material de baixo índice, e (b) de baixo índice de refração em alto índice. Além do mais, é possível que o PBG em determinada estrutura exista para uma polarização, mas não para a outra, ou para ambas.

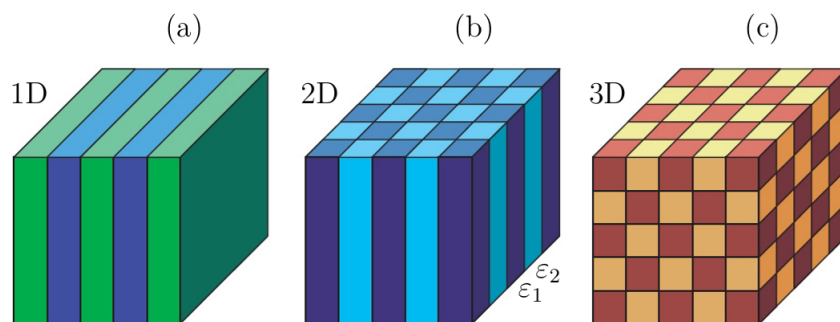
Figura 3. Cristal fotônico bidimensional formado pela distribuição periódica de: (a) hastes dielétricas em um substrato de ar; (b) colunas de ar perfuradas em um substrato dielétrico.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Em um cristal fotônico 3D, a constante dielétrica muda periodicamente em todas as direções. Portanto, não há eixo ao longo do qual a luz pode propagar na estrutura [64]. Isso resulta em uma abertura de faixa completa. Em 1D e 2D pode-se localizar luz no defeito pontual ou de linha, mas em 3D existe uma capacidade extra para localizar a luz em todas as direções. De fato, a periodicidade dos cristais fotônicos pode ocorrer em uma, duas ou três dimensões, mas o foco deste trabalho são os cristais fotônicos 2D. Os diferentes tipos de cristais fotônicos são ilustrados na Figura 4.

Figura 4. Ilustração do cristal fotônico periódico em (a) uma direção, (b) duas direções e (c) três direções. As cores diferentes correspondem aos dois materiais diferentes, com as constantes dielétricas diferentes ε_1 e ε_2 .



Fonte: Adaptado de [1].

Em uma estrutura baseada em cristal fotônico 2D, a periodicidade da função dielétrica ocorre em duas direções, enquanto que na terceira o meio é uniforme. Consequentemente, uma grande variedade de configurações de estruturas pode ser alcançada variando-se os materiais dielétricos, a geometria da rede (quadrada ou hexagonal), a constante de rede 'a' e a forma dos dielétricos (quadrado, triângulo, elipse). No entanto,

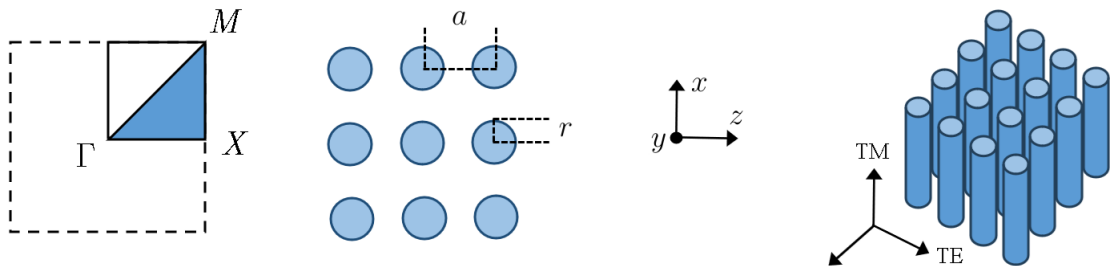
por razões tecnológicas, dois tipos de configurações são comumente utilizadas: as redes hexagonais (ou triangulares), e principalmente, as redes quadradas, conforme ilustradas nas Figuras 3 e 5, respectivamente.

2.2.1 Cristais Fotônicos Bidimensionais

A partir deste momento, será dada ênfase aos cristais fotônicos bidimensionais, uma vez que são utilizados para o desenvolvimento dos dispositivos fotônicos que serão propostos. Nos últimos anos, os cristais fotônicos bidimensionais têm chamado bastante atenção de cientistas em várias partes do mundo, porque possuem características construtivas e de análise bastante atrativas, sobretudo para a indústria.

Para todos os efeitos deste trabalho, considera-se os cristais fotônicos bidimensionais com uma rede quadrada, conforme ilustrado na Figura 5, em que ‘ a ’ é a constante de rede da estrutura e ‘ r ’ é o raio das suas hastes dielétricas, com o diâmetro $d = 2r$. Os dispositivos que serão propostos são bastante compactos, pois são baseados em cristais fotônicos, e portanto, podem ser projetados em dimensões bastante reduzidas, contribuindo assim com a densidade de integração de componentes em sistemas de comunicações ópticas.

Figura 5. Cristal fotônico 2D, onde ‘ a ’ e ‘ r ’ são os parâmetros projetivos da estrutura.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

2.3 Tipos de Defeitos

As propriedades dos cristais fotônicos 2D podem ser alteradas por meio de um processo em que as hastes dielétricas (ou furos de ar, etc.) são adicionadas ou removidas de uma certa região. Esta alteração na estrutura dielétrica é conhecida como um defeito, que pode ser pontual ou de linha [1]. Nestes defeitos podem ocorrer o confinamento de ondas eletromagnéticas EM na estrutura PBG [1]. Os defeitos pontuais são utilizados para prender a luz, enquanto que os defeitos de linha podem constituir guias de onda na estrutura. Além da criação de defeitos na estrutura, o funcionamento de diversos tipos de dispositivos baseados em cristais fotônicos 2D, geralmente está associado à existência da banda proibida [43], [41].

A inserção de defeitos em determinada estrutura fotônica pode gerar guias de onda que permitem o confinamento e a propagação de ondas eletromagnéticas que estão associadas à banda proibida da estrutura, responsável pelo guiamento e confinamento da luz [1, 44, 45]. A periodicidade de um cristal fotônico é interrompida pela introdução de defeitos na estrutura, que podem ser criados por meio da remoção de uma camada de furos do cristal, ou pela retirada ou acréscimo de hastes dielétricas de um certo material, ou ainda alterando-se o diâmetro de uma linha de furos, ou alterando a distância entre os furos ou entre as hastes, de modo que um sinal eletromagnético pode ser confinado no interior do defeito [1].

Alterando-se uma região da rede, por exemplo, modificando-se a constante dielétrica de uma ou de várias colunas, ou removendo-as, provoca-se um defeito ou perturbação ao longo de uma linha ou coluna na direção z . Por sua vez, este defeito criado na direção z quebra a simetria da constante dielétrica periódica na estrutura, ocasionando o surgimento de um modo nesta região, que não se espalha na estrutura de cristal fotônico, ficando confinado no interior do defeito criado, uma vez que este modo possui frequência dentro da faixa PBG [58, 59, 60]. Esse distúrbio é conhecido como um defeito pontual ou de cavidade. A cavidade formada é cercada por paredes refletoras que determinam o modo de guiamento. Em geral, os defeitos pontuais em cristais fotônicos são utilizados para prender a luz, como no caso de cavidades ressonantes.

Os defeitos lineares são utilizados para guiar a luz a partir de uma posição para outra [1]. A ideia principal é formar um guia de ondas a partir da estrutura de cristal fotônico, alterando um conjunto linear de hastes dielétricas do cristal, conforme mostrado na Figura 6 (b). A luz com a sua frequência no intervalo de banda fotônica, propaga-se no guia de ondas, e, portanto, está confinada ao defeito, de modo que pode ser controlada ao longo do mesmo [1].

2.4 Tipos de Estruturas Baseadas em Cristais Fotônicos

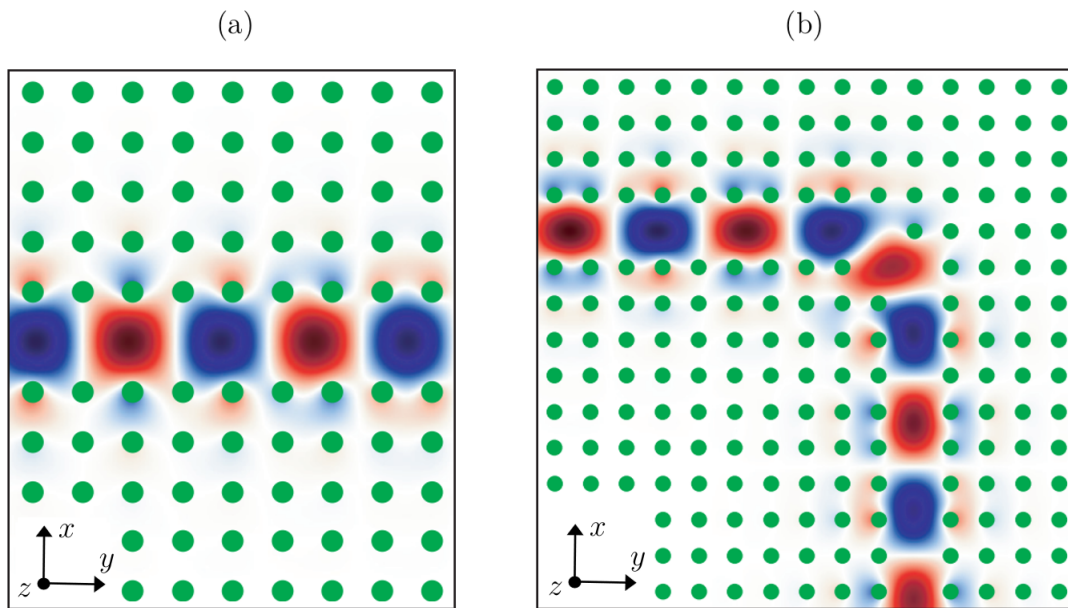
Nesta seção serão apresentados alguns exemplos de estruturas baseadas em cristais fotônico bidimensionais. Estas estruturas são as mais comumente encontradas em diversas aplicações em circuitos integrados fotônicos.

2.4.1 Guias de Onda

Criando-se imperfeições ou defeitos na estrutura, com a retirada, inserção, modificação ou troca de elementos da rede cristalina de um cristal fotônico 2D, é possível construir inúmeros dispositivos capazes de propagar os modos eletromagnéticos no defeito, inicialmente proibidos. Alguns exemplos destes dispositivos ou aplicações são: os guias de onda, as trilhas de circuitos impressos, os filtros PBG, os anéis ressoadores e as cavidades

ressonantes. Na Figura 6, (a) e (b), pode-se observar o campo elétrico E_z propagando no plano xy de um guia de ondas que é baseado em um cristal fotônico 2D, com as hastes dielétricas na cor verde. A Figura 6 (a) mostra a propagação do campo por um determinado caminho, resultado de um defeito linear produzido na estrutura. A Figura 6 (b) mostra a propagação do campo com uma curva acentuada de 90° .

Figura 6. Ilustração de guias de onda baseados em cristal fotônico 2D, projetados utilizando uma rede quadrada de hastes dielétricas: (a) em linha reta; (b) com dobramento de 90 graus.



Fonte: Adaptado de [1].

A Figura 6 (b) mostra um guia de ondas construído por meio da realização de sucessivos defeitos lineares na estrutura, com a retirada de hastes dielétricas, formando um guia de ondas com dobramento de 90 graus. Além do mais, a Figura 6 (b) mostra a propagação dos campos eletromagnéticos no guia de ondas, no qual podemos observar que a curva de 90° não oferece resistência ao guiamento da luz, havendo assim um confinamento praticamente sem perdas na estrutura. Aliás, esta é uma das vantagens que os guias de onda de cristais fotônicos possuem, não sendo possível nas fibras ópticas, por exemplo, devido às altas perdas que ocorrem.

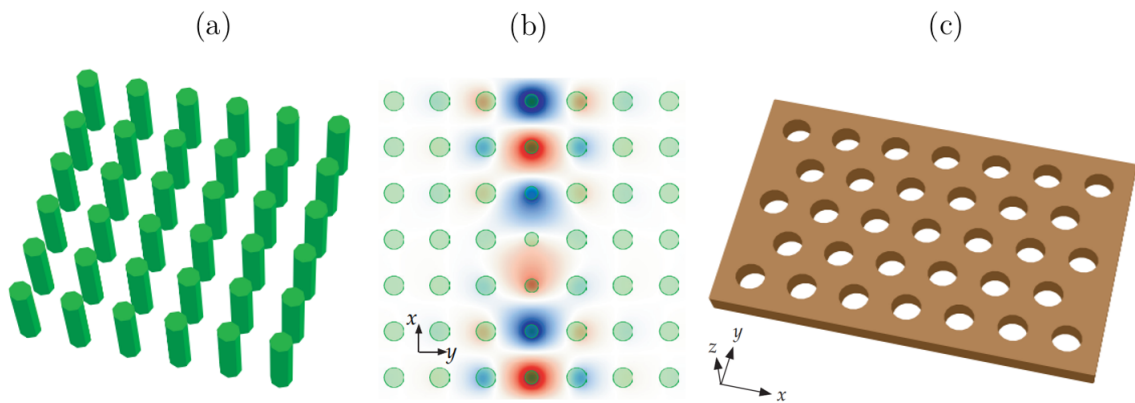
Para uma estrutura baseada em um cristal fotônico 2D funcionar como um guia de ondas, é necessário introduzir defeitos que alterem a periodicidade da estrutura. Neste sentido, existem diversas formas em que defeitos lineares podem ser criados em cristais fotônicos, no entanto, existe a condição de que a simetria deve ser mantida nas direções. Isto pode ser conseguido, por exemplo, por meio da criação de defeitos pontuais na estrutura, pela remoção de cada haste dielétrica ao longo de uma única linha, o que resultará em guias

de onda horizontais ou verticais, com apenas um modo guiado na frequência determinada pelo PBG da estrutura [65].

2.4.2 Fitas de Cristal Fotônico

Em um cristal fotônico 2D, baseado em uma rede periódica de furos de ar ou de hastes dielétricas, podem ocorrer vários tipos de defeitos, sejam pontuais ou de linha. Estes defeitos podem ser criados removendo-se uma linha de furos do cristal ou alterando o diâmetro dos furos de uma linha, ou ainda alterando o diâmetro de uma ou de várias hastes dielétricas que compõem uma linha, de modo que um sinal eletromagnético seja confinado no interior do defeito [45], como se pode observar na Figura 7 (b). Para realizar fenômenos típicos de um cristal fotônico 2D em três dimensões, o projeto mais simples é fabricar um cristal periódico 2D com uma altura finita. Estas estruturas fotônicas são amplamente conhecidas como fitas de cristais fotônicos (PhCSs – *Photonic Crystals Slabs*), conforme representado na Figura 7 (c).

Figura 7. (a) Cristal fotônico do tipo *slab* baseado em uma rede periódica quadrada de hastes dielétricas; (b) Propagação do campo eletromagnético no guia de onda com defeito de linha de raio reduzido; (c) Cristal fotônico do tipo *slab* em uma rede triangular de furos em ar.



Fonte: Adaptado de [1].

Em geral fica claro que uma das grandes vantagens dos cristais fotônicos é a possibilidade de manipular a radiação eletromagnética em todas as direções espaciais. Para controlar a luz nas três dimensões, os cristais fotônicos tridimensionais constituem a plataforma ideal. Os trabalhos pioneiros de S. John [58] e E. Yablonovitch [59] abordaram tais estruturas 3D, que também oferecem a manipulação da luz nas direções espaciais. Embora existam alguns avanços na demonstração dos cristais fotônicos tridimensionais, estas estruturas são tecnologicamente bastante desafiadoras, apresentando algumas etapas críticas no processo de fabricação de dispositivos e circuitos funcionais em grande escala [66, 67, 68].

Um cristal fotônico bidimensional incorporado em guias de onda dielétricos planares, conhecidos como fitas de cristais fotônicos, surgiram na última década como os melhores candidatos para confinar e guiar eficientemente os campos eletromagnéticos em frequências ópticas em três dimensões [69, 70, 71]. Os guias de onda baseados em cristais fotônicos 2D do tipo *slab*, são constituídos por meio da remoção de uma fileira de orifícios de ar a partir de uma rede periódica 2D, que pode ser do tipo quadrada ou triangular. Isto introduz um defeito de linha dentro da rede periódica.

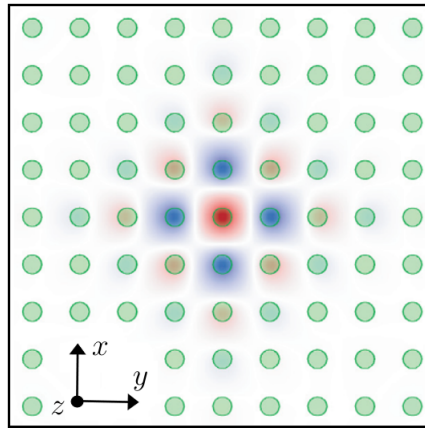
De modo geral, é desejável obter um cristal fotônico que apresente uma estrutura menos complexa, não apenas por razões de custo, mas também devido à integração mais simples em processos de produção já existentes. Os circuitos ópticos integrados ou PICs, por exemplo, são construídos de forma semelhante aos circuitos microeletrônicos, em substratos planos em várias etapas de fabricação, camada por camada [66].

Na integração de cristais fotônicos 3D, que devem ser adicionalmente construídos a partir do plano, representa um grande desafio [67]. Neste sentido, uma solução interessante em termos de simplicidade de estrutura e manipulação da luz em todas as direções espaciais, são as fitas de cristal fotônico [45]. Estas estruturas consistem em uma camada dielétrica com índice de refração mais alto em relação a sua parte periódica. Em [45], os autores publicam o conceito de fitas de cristal fotônico, consistindo em estruturas com redes periódicas 2D de extensão finita, nas quais são introduzidos estreitos canais por onde a luz pode ser guiada com mínimas perdas.

A criação de um defeito pontual em uma fita de cristal fotônico é uma perturbação que quebra a periodicidade de sua função dielétrica, e isto pode ser feito removendo-se uma ou mais características dielétricas. Se o defeito projetado reunir as condições necessárias para suportar um modo eletromagnético, este defeito captura o modo de forma semelhante ao defeito pontual correspondente em um cristal fotônico bidimensional infinito [1]. Criando-se defeitos pontuais na estrutura, obtém-se as chamadas cavidades ressonantes, conforme mostrado na Figura 8.

O mecanismo de guiamento da luz nos guias de onda dielétricos convencionais ocorre por meio do mecanismo da reflexão interna total, mas este mecanismo pode confinar a onda eletromagnética apenas na região de maior constante dielétrica. Neste caso, o mecanismo de orientação é o *band gap*, que é independente das propriedades do material que preenche o núcleo. Esta propriedade é muito importante para um grande número de aplicações em que é necessária a redução da interação entre o material dielétrico e a luz. Considerando o caso dos cristais fotônicos do tipo *slab*, o mecanismo de confinamento vertical é dado pela reflexão interna total (TIR), mas no plano a propagação é controlada via reflexão de Bragg distribuída (DBR – *Distributed Bragg Reflection*). Portanto, as bandas fotônicas nesses sistemas são condicionadas pelos mecanismos TIR e DBR.

Figura 8. Cavidade ressonante baseada em cristal fotônico bidimensional formada por um defeito pontual.



Fonte: Adaptado de [1].

2.4.3 Ressonadores Ópticos

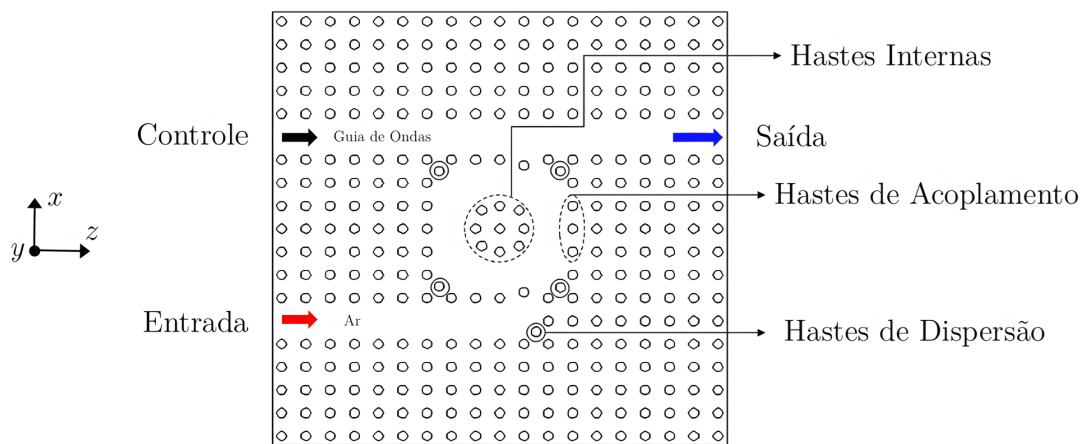
Neste capítulo, a teoria dos cristais fotônicos é estudada com o objetivo de ser aplicada na modelagem de diversas estruturas de reconhecido interesse científico e tecnológico, tais como filtros de cavidades ressonantes e os ressoadores ópticos. Um ressoador é um dispositivo que exibe comportamento ressonante, ou seja, oscila naturalmente a determinadas frequências, denominadas de frequências de ressonância. Estes ressoadores podem ser construídos por meio de estruturas de cristais fotônicos, simulando efeitos de espelhos e obtendo múltiplas reflexões. Neste trabalho, os anéis ressoadores baseados em cristais fotônicos 2D são utilizados para a obtenção de uma porta lógica totalmente óptica, além de roteadores totalmente ópticos.

Os dispositivos ressonantes são projetados por meio da alteração controlada da geometria da estrutura de rede cristalina, por meio da criação de um ou de vários defeitos sucessivos que podem ser de vários tipos e apresentar finalidades diferentes, dependendo apenas dos objetivos dos projetos. Portanto, somente são projetados os dispositivos capazes de propagar os modos eletromagnéticos no defeito criado, conforme a banda proibida para as estruturas. A geometria em forma de anel, comumente relatada como anéis ressoadores, propicia uma grande interação entre a onda propagante e o meio material, possibilitando diversas aplicações importantes, por exemplo, em sensoriamento, como em biosensores. Em geral, quando estes anéis ressoadores são baseados em cristais fotônicos bidimensionais, estes são denominados e referenciados como anéis ressoadores de cristais fotônicos (PhCRRs – *Photonic Crystals Ring Resonators*).

Estas estruturas (PhCRRs) são bastante estudadas e relacionadas na literatura em diversas aplicações, sendo que diferentes configurações foram propostas com o intuito de

otimizar a sua resposta espectral, visando cada vez mais, uma maior miniaturização das estruturas, implicando em uma maior flexibilidade de projetos de sistemas de comunicações ópticas, apresentando um alto fator de integração entre diferentes componentes. Um exemplo de uma cavidade ressonante na forma de um anel ressoador bidimensional, com uma estrutura periódica baseada em cristais fotônicos em rede quadrada, funcional no plano xz , é mostrado na Figura 9. Nesta estrutura, as entradas são indicadas por ‘C’ e ‘I’, e a porta de saída é indicada por ‘B’.

Figura 9. Detalhes de uma estrutura baseada em um cristal fotônico bidimensional com um PhCRR acoplado aos guias de onda horizontais (guia de ondas superior e inferior), e contraste de índices de refração alto/baixo, ou seja, $n_{\text{hastes}}/n_{\text{ar}} = 3,9/1$. O *design* da estrutura foi feito utilizando-se do *software* OptiFDTD, disponível em <https://optiwave.com>.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

A estrutura mostrada na Figura 9 compõem uma chave óptica, mais particularmente, trata-se de uma porta lógica totalmente óptica. O diâmetro do PhCRR é $d = 6a$. O tamanho total da referida estrutura é cerca de $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$, que é bem menor do que muitas portas lógicas ópticas baseadas em cristais fotônicos, em comparação com outros trabalhos.

Um guia de ondas de entrada está marcado como sinal de controle ‘C’, sendo mostrado a partir do guia de ondas horizontal superior, que foi criado por meio da remoção controlada de um número necessário de hastes dielétricas de silício. A entrada ‘I’ representa a parte inicial de um outro guia de ondas, que está conectado horizontalmente com o PhCRR. Na extremidade do guia de ondas da porta de entrada ‘I’, uma haste de dispersão foi inserida por meio do desvio de sua posição original por $0,707a$ no plano xz , o que impede as reflexões para trás devido à curva formada no guia de ondas. As hastes de dispersão foram inseridas em cada um dos quatro cantos do PhCRR, e com a mesma constante de rede, com o intuito de melhorar a eficiência de acoplamento do modo. As hastes situadas no interior do PhCRR são chamadas de hastes internas.

O PhCRR mostrado na Figura 9 foi projetado por meio da variação da posição das suas hastes internas, a partir de suas posições originais, enquanto que as hastes internas foram obtidas pela variação da posição das hastes adjacentes nos quatro lados, a partir do seu centro por $0,25a$ nas direções x e z . Para determinar uma microcavidade de formato circular, o anel exterior foi projetado deslocando-se as hastes de canto por $0,25a$. Finalmente, as hastes de acoplamento estão inseridas no PhCRR, entre os guias de onda horizontais.

Em geral, os ressoadores ópticos, também são conhecidos por cavidades ressonantes ou por microcavidades ópticas, sendo utilizadas principalmente para gerar feixes ópticos de alta intensidade. Basicamente, as cavidades ressonantes são dispositivos que armazenam energia na forma de campos eletromagnéticos. As cavidades são compartimentos geralmente encontrados nas formas cilíndrica e retangular.

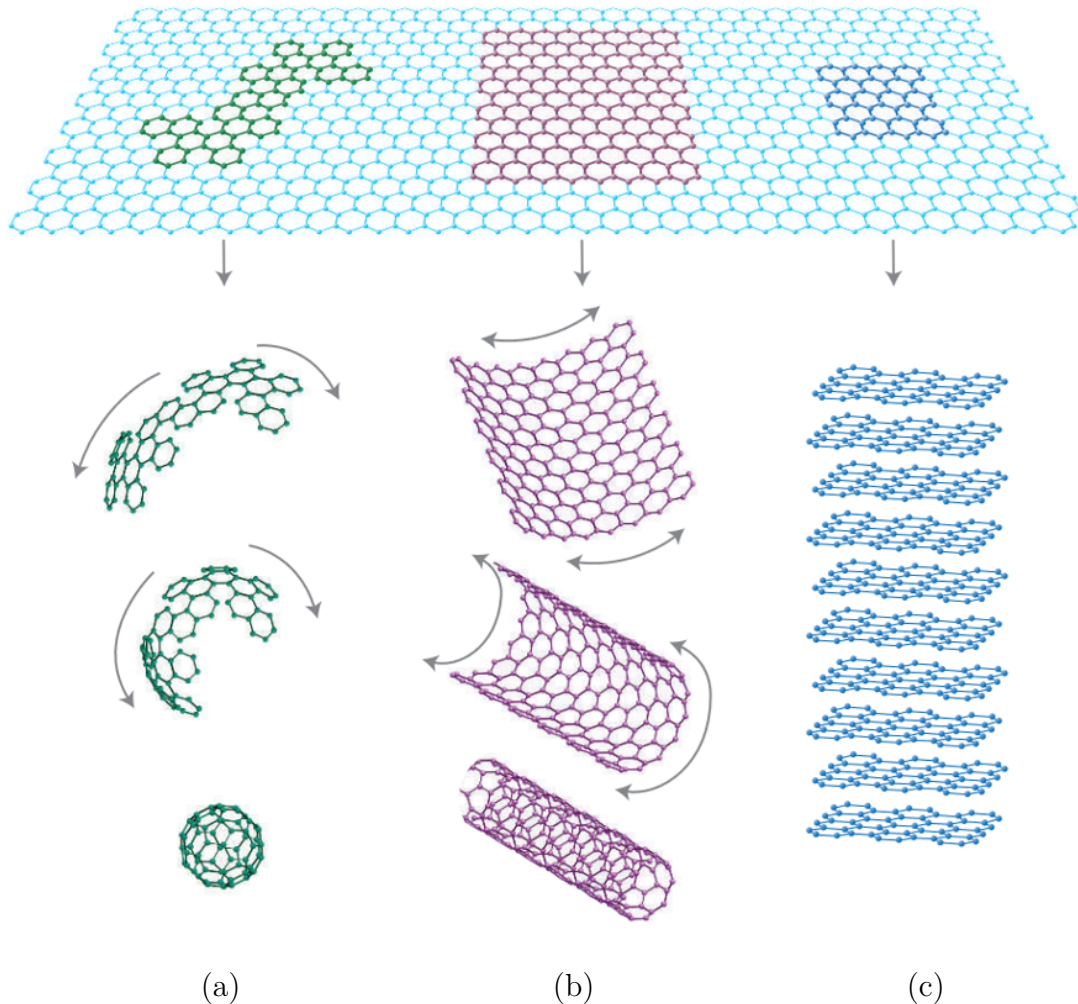
2.5 Grafeno

Os materiais que são inteiramente compostos por carbono possuem vários alótropos. Na natureza, o grafite e o diamante são os alótropos principais do carbono. Nas últimas décadas, uma variedade de novas nanoestruturas de alótropos de carbono foram descobertas, entre as quais, o fulereno, os nanotubos de carbono e o grafeno [72]. A estrutura atômica destes alótropos de carbono está ilustrada na Figura 10.

O grafeno pode ser definido como um material bidimensional formado por uma única camada plana de átomos de carbono firmemente compactados em uma rede hexagonal, e posicionados como favos de mel. Considerando a família de materiais bidimensionais, o grafeno tem sido o material mais amplamente estudado devido à sua alta mobilidade, flexibilidade, robustez, estabilidade ambiental e sua transparência óptica, tornando-o um candidato promissor para pesquisas fundamentais e aplicações elétricas, ópticas e optoeletrônicas [73]. O grafeno é bem conhecido por sua grande força intrínseca que excede a de qualquer outro material [74] e alta condutividade elétrica ajustável [75]. Os resultados mais recentes demonstram que a condutividade térmica do grafeno é de ~ 1300 W/mK à temperatura ambiente [76]. Além do mais, Novoselov *et al.* foi o primeiro que demonstrou os férmions de Dirac sem massa no grafeno, além de medir o efeito do campo elétrico no grafeno [75].

A condutividade elétrica para o grafeno aumenta de acordo com o efeito obtido decorrente da voltagem que é utilizada nos dispositivos compostos de uma monocamada plana de átomos de carbono, atingindo o seu mínimo quando a voltagem é zero [77]. Além do mais, devido a sua hibridização sp^2 , o grafeno apresenta em sua configuração, uma rede hexagonal e ligações covalentes muito fortes, o que implica que o grafeno pode combinar no mesmo material, uma elevada rigidez acompanhada de uma alta flexibilidade [78], [79].

Figura 10. Alguns alótropos de carbono de várias dimensões, materiais da família do carbono: (a) *Bulky ball* (0D); (b) Nanotubo de carbono (1D); (c) Grafite (3D) [77].



Fonte: Adaptado de [81].

De acordo com o formalismo de Kubo [80], a condutividade do grafeno consiste em componentes intrabanda e interbanda, ou seja, $\sigma_g = \sigma_{intra} + \sigma_{inter}$, que são dados por

$$\sigma_{intra} = \frac{ie^2 k_B T}{\pi \hbar^2 (\omega - i2\Gamma)} \left[\frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left(e^{\mu_c/k_B T} + 1 \right) \right], \quad (2.1)$$

$$\sigma_{inter} = \frac{ie^2}{4\pi \hbar^2} \ln \left[\frac{2|\mu_c| - (\omega + i2\Gamma) \hbar}{2|\mu_c| + (\omega + i2\Gamma) \hbar} \right], \quad (2.2)$$

em que e é a carga de um elétron, k_B é a constante de Boltzmann, \hbar é a constante de Planck reduzida, ω é a frequência radiana, T é a temperatura, Γ é a taxa de espalhamento e, μ_c é o potencial químico que pode ser ajustado pela densidade da portadora (dopagem química) ou por uma tensão de porta [80].

O índice de refração complexo do grafeno pode ser obtido por

$$n_g = \sqrt{1 + \frac{i\sigma_g}{\omega\varepsilon_0\Delta}}, \quad (2.3)$$

em que ε_0 é a permissividade no espaço livre e $\Delta = 0,34$ nm é a espessura do grafeno de camada única (SLG – *Single-Layer Graphene*) [80]. Neste trabalho, um valor típico de $\Gamma = 0,43$ meV e $T = 300$ K, são considerados para calcular a propriedade óptica do grafeno. Observa-se que o índice de refração do grafeno n_g [77] é determinado por sua condutividade σ_g , que por sua vez é dependente do potencial químico para uma determinada folha de grafeno e frequência radiana específica, o que leva à variação nas características do modo e, portanto, na ressonância dos dispositivos.

As propriedades eletromagnéticas do grafeno são baseadas em sua estrutura atômica única e também na lacuna eletrônica entre as camadas da folha de grafeno. Talvez o resultado mais importante decorrente do estudo da condutividade dos férmions de Dirac [75], é a existência de uma condutividade real, universal e independente de frequência para o grafeno, ou seja, de que à temperatura $T = 0$, a condutividade óptica do grafeno é determinada pela constante fundamental [82]

$$\sigma_0 = \frac{e^2}{4\hbar}, \quad (2.4)$$

que é independente da frequência ω . Por se tratar de um material bidimensional, os férmions de Dirac sem massa no grafeno possuem uma propriedade surpreendente: a resposta óptica é universal, sendo expressa apenas em relação à constante de estrutura fina α , que define a transparência visual do grafeno [83], ou seja, a correspondente absorvância do grafeno é dada por

$$A(\omega) = \pi\alpha \quad (2.5)$$

A absorção óptica [73], [83] observada para o grafeno é de aproximadamente 2,3 %, sendo esta uma absorção universal para as diferentes frequências incidentes no grafeno de camada única, ou seja, um valor praticamente constante para frequências variando de 300 a 2500 nm [73]. Conseqüentemente, a transmitância óptica em uma SLG é de aproximadamente 97,7 %, enquanto que o valor obtido para a refletância é $< 0,1$ % da luz incidente [73], [84]. Em geral, a absorção óptica das camadas de grafeno é proporcional ao número de camadas, cada uma absorvendo $\sim 2,3$ %, e portanto, teremos que a absorvância do grafeno de camada N é dada por

$$N \cdot A(\omega), N \in \mathbb{N}. \quad (2.6)$$

3 PORTAS LÓGICAS E ROTEADORES

A crescente evolução das tecnologias na área de telecomunicações, tornou evidente o papel fundamental que a óptica e a fotônica exercem no aprimoramento dos sistemas de comunicações. Desta maneira, à medida que o consumo global de dados continua a aumentar, impulsionado pela ampla utilização da internet das coisas (IoT – *Internet of Things*), redes 5G e conteúdo multimídia de alta definição, a demanda por métodos de transmissão eficientes e de alta capacidade nunca foi tão evidente [42], [85].

A pesquisa atual no campo da óptica e da fotônica concentra-se no desenvolvimento de dispositivos ópticos avançados para aplicações em circuitos integrados fotônicos. Entre estes dispositivos ópticos, podemos citar os sensores de fibra óptica e as tecnologias de *laser*, que são essenciais para abordar desafios relacionados a limitações de largura de banda, integridade do sinal e eficiência energética. Estas inovações não apenas facilitam e possibilitam um sistema de comunicações mais rápido e confiável, mas também permitem a implantação de redes de última geração que oferecem suporte a uma ampla variedade de aplicações, que vão de cidades inteligentes a telemedicina. A exploração contínua de dispositivos ópticos e fotônicos é essencial para sustentar o crescimento e a resiliência da infraestrutura global de telecomunicações, tornando-a uma área vibrante e crucial para a pesquisa acadêmica e industrial [85], [86].

No âmbito das telecomunicações e processamento de informações, as portas lógicas e os roteadores de comprimento de onda desempenham papéis distintos, porém complementares. As portas lógicas, componentes fundamentais de circuitos digitais, desempenham funções lógicas básicas, como as operações AND, OR e NOT, permitindo a manipulação de dados binários. Com efeito, as portas lógicas são essenciais para executar cálculos e controlar processos em dispositivos eletrônicos, formando a base fundamental dos sistemas de computação modernos. Por sua vez, os roteadores de comprimento de onda operam no nível óptico, direcionando sinais de luz de diferentes comprimentos de onda por meio de uma rede. Estes dispositivos roteadores são cruciais para gerenciar o tráfego de dados em sistemas de comunicação de fibra óptica, permitindo que vários canais coexistam em uma única fibra sem interferências [86], [87].

De modo geral, enquanto que as portas lógicas estão principalmente preocupadas com o processamento dos dados e com a tomada de decisões em formatos eletrônicos, por sua vez os roteadores de comprimento de onda facilitam a transmissão e o roteamento de dados em alta velocidade em redes ópticas. As portas lógicas e os roteadores são estruturas que exemplificam a convergência de tecnologias eletrônicas para fotônicas, destacando a importância de ambas no avanço da infraestrutura de telecomunicações [85–89].

3.1 Portas Lógicas Totalmente Ópticas

As portas lógicas digitais que são baseadas em elétrons foram fundamentais para o desenvolvimento da computação moderna e da eletrônica digital. A ideia de utilizar-se dos componentes eletrônicos para executar as operações lógicas remonta a meados do século XX, com a invenção do transistor em 1947, que permitiu a miniaturização e integração de circuitos. Os primeiros computadores utilizavam válvulas de vácuo e transistores discretos para criar portas lógicas, levando ao desenvolvimento de circuitos integrados na década de 1960. Essa inovação aumentou significativamente a velocidade e a eficiência dos dispositivos eletrônicos, abrindo caminho para a revolução digital [86, 88, 91, 92].

No entanto, à medida que a tecnologia avançava, os pesquisadores começaram a explorar as limitações dos sistemas baseados em elétrons, principalmente em relação à velocidade, ao consumo de energia e à dissipação de calor. Isso levou a uma mudança de foco em direção a portas lógicas totalmente ópticas (AOLGs – *All-Optical Logic Gates*), que utilizam fótons em vez de elétrons para executar as operações lógicas. A promessa é que as AOLGs possam superar algumas das limitações inerentes aos circuitos eletrônicos, permitindo assim um processamento de dados mais rápido, além de um menor consumo de energia, uma vez que os fótons podem viajar na velocidade da luz e não geram calor da mesma forma que os elétrons. Esta transição reflete um interesse crescente em aproveitar as propriedades exclusivas da luz para as aplicações em computação, levando a pesquisas inovadoras em fotônica e ao desenvolvimento de dispositivos ópticos de última geração que podem revolucionar o processamento de informações e as telecomunicações [86], [88–93].

O surgimento dos cristais fotônicos bidimensionais representa uma mudança tecnológica significativa para o *design* e implementação de dispositivos típicos de portas lógicas. Ao contrário da tecnologia tradicional de silício sobre isolante (SOI – *Silicon-On-Insulator*), que depende de materiais em grandes quantidades para manipular elétrons, os cristais fotônicos bidimensionais alavancam estruturas periódicas na nanoescala para controlar a propagação de fótons. Os cristais fotônicos bidimensionais podem criar bandas proibidas permitindo a manipulação precisa da luz em comprimentos de onda específicos, o que é essencial para o desenvolvimento de AOLGs altamente eficientes [91], [93].

Com efeito, as propriedades exclusivas dos cristais fotônicos bidimensionais permitem a integração de múltiplas funcionalidades em um espaço compacto, facilitando a criação de operações lógicas complexas com uma perda mínima de energia. Essa inovação não apenas aumenta a velocidade e a eficiência do processamento de dados, mas também abre novos caminhos para circuitos fotônicos escaláveis, abrindo caminho para aplicações avançadas em telecomunicações, computação quântica, entre outras. A pesquisa continua a explorar o potencial dos cristais fotônicos, que estão prontos para desempenhar um papel fundamental no futuro das tecnologias de computação óptica [1], [91, 92, 93].

De fato, a transição para a utilização de cristais fotônicos bidimensionais no *design* de dispositivos para a obtenção de portas lógicas, oferece várias vantagens que melhoram tanto o desempenho quanto a funcionalidade dos projetos. Com efeito, um dos principais benefícios é a capacidade de atingir velocidades de comutação ultrarrápidas, pois os fótons podem viajar por essas estruturas na velocidade da luz, reduzindo significativamente a latência em comparação aos sistemas tradicionais baseados em elétrons [91], [92].

Além do mais, a escalabilidade inerente aos cristais fotônicos bidimensionais permite a integração de múltiplas funções lógicas em um único dispositivo, levando a *designs* de circuitos mais compactos e eficientes. Esta miniaturização não apenas conserva espaço, mas também reduz os custos de fabricação e o consumo de energia [91], [93].

As propriedades ópticas exclusivas dos cristais fotônicos permitem a criação de filtros e guias de onda altamente seletivos, que podem melhorar a integridade dos sinais e reduzir a diafonia em redes complexas. De modo geral, a adoção dos cristais fotônicos 2D para o *design* de portas lógicas representa um avanço transformador que se alinha com a crescente demanda por novas soluções de computação mais rápidas, eficientes e com baixo consumo de energia no cenário das telecomunicações [91, 92, 93].

As portas lógicas são dispositivos que operam com um ou mais valores lógicos iniciais (ou sinais lógicos de entrada) para gerar apenas uma saída lógica, que depende da função que é implementada no circuito lógico. As portas lógicas digitais são os componentes básicos para a criação e a implementação dos circuitos lógicos digitais, além de circuitos integrados mais complexos, entre os quais, podemos citar os processadores e os microcontroladores. Em outras palavras, as portas lógicas digitais são blocos fundamentais a partir dos quais os circuitos lógicos (ou sistemas digitais) são construídos [91, 93, 94].

O comportamento das portas lógicas é descrito e conhecido pela tabela verdade da operação, que apresenta os estados lógicos das entradas e das saídas. Existem sete tipos de portas lógicas básicas, ou seja: AND, NAND, OR, NOR, XOR, NXOR e NOT. Na eletrônica digital, apenas dois números são permitidos: ‘1’ e ‘0’ [94], [95].

Em eletrônica digital, existem dois conjuntos de símbolos para as portas lógicas elementares que são bastante comuns, os conjuntos ‘*distinctive shape*’ e ‘*rectangular shape*’, ambos definidos pela organização ANSI (*American National Standards Institute*) / IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) Std 91-1984 e ANSI / IEEE Std 91a-1991 [94, 95, 96]. Apresentaremos o conjunto de *distinctive shape* (IEEE Std 91/91a-1991), mais utilizado para ilustrações simples [95, 96, 97]. Com efeito, o objetivo é fornecer um método mais uniforme para descrever todas as funções lógicas complexas típicas dos circuitos digitais com símbolos padronizados. Estas funções podem ser circuitos de média escala, como um contador de 4 *bits*, ou até mesmo um circuito de grande escala, como um microprocessador [94], [95].

3.1.1 Porta Lógica E (AND Logic Gate)

A porta lógica AND realiza uma operação lógica com dois valores lógicos iniciais, resultando em um valor lógico verdadeiro apenas se todos os valores lógicos de entrada tiverem um valor verdadeiro. O símbolo e a equação Booleana para a porta lógica AND estão indicados na Figura 11. Os resultados das operações lógicas realizadas pela porta AND podem ser resumidos por meio da Tabela 1 [91], [94].

De modo geral, se A e B são as duas entradas lógicas, então na saída teremos o resultado da operação denotada por $A \cdot B$. Desta forma, se todos os valores lógicos de entrada forem iguais a '1', então a operação resulta em uma saída '1'. Em outras palavras, se qualquer um dos valores de entrada for '0', então a operação da porta AND resultará em um valor lógico de saída igual a '0' [94], [97].

Figura 11. Símbolo e equação Booleana para a porta lógica AND.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Tabela 1. Tabela verdade para a porta lógica AND.

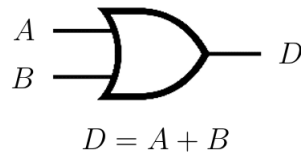
A	B	D
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

3.1.2 Porta Lógica OU (OR Logic Gate)

A porta lógica OR realiza a operação lógica com dois ou mais valores lógicos iniciais, resultando em um valor lógico 'falso' se, e somente se, todos os valores lógicos de entrada tiverem um valor 'falso'. Sendo assim, se A e B são duas entradas, então na saída tem-se o resultado da operação denotada por $A + B$. Em outras palavras, a porta resulta em uma saída '1', se qualquer um dos valores de entrada for igual a '1', e resultará em um valor lógico de saída igual a '0' apenas se todos os valores de entrada forem iguais a '0'. O símbolo e a equação Booleana para a porta lógica OR estão indicados na Figura 12. Os resultados das operações lógicas realizadas pela porta OR podem ser resumidos por meio da Tabela 2 [92], [94].

Figura 12. Símbolo e equação Booleana para a porta lógica OR.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Tabela 2. Tabela verdade para a porta lógica OR.

A	B	D
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

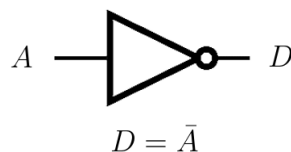
3.1.3 Porta Lógica NÃO ou INVERSORA (NOT *Logic Gate*)

A porta lógica NOT realiza a operação lógica de inversão dos valores lógicos iniciais, e por este motivo é geralmente chamada de inversora. Portanto, a sua função é inverter o valor da variável de entrada. Sendo assim, se o valor de entrada for ‘0’, então a porta resulta em uma saída de valor ‘1’, e se o valor de entrada for ‘1’, então a porta resulta em uma saída de valor ‘0’ [97].

A porta lógica NOT é uma das três portas lógicas básicas existentes, a partir das quais, qualquer circuito Booleano pode ser projetado e implementado. A partir da porta NOT, juntamente com a porta AND e a porta OR, qualquer função em matemática binária pode ser projetada e implementada, em outras palavras, todas as outras portas lógicas podem ser projetadas a partir destas três portas básicas [92], [94].

De fato, o símbolo e a equação Booleana para as operações da porta lógica NOT estão indicados na Figura 13. Os resultados das operações lógicas realizadas pela porta NOT podem ser resumidos por meio da Tabela 3.

Figura 13. Símbolo e equação Booleana para a porta lógica NOT.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Tabela 3. Tabela verdade para a porta lógica NOT.

A	D
0	1
1	0

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

3.1.4 Porta Lógica NÃO E (NAND *Logic Gate*)

Basicamente, a operação da porta NAND é o inverso da porta AND. A porta lógica NAND resulta em uma saída que é o inverso da saída obtida pela porta AND, sendo assim, a sua saída lógica resultará sempre no valor ‘0’ desde que todos os valores lógicos de entrada sejam iguais a ‘1’. Em caso contrário, o valor lógico da sua saída será ‘1’. A operação da porta lógica NAND, é também chamada de negação alternativa, sendo verdadeira se pelo menos um dos valores de entrada for falso. Desta maneira, se A e B são duas entradas, então na saída tem-se o resultado da operação $\overline{A \cdot B}$. Em outras palavras, a porta produz uma saída ‘1’, se qualquer um dos sinais de entrada for igual a ‘0’, e produzirá uma saída igual a ‘0’ apenas se todos os sinais de entrada forem iguais a ‘1’. Na álgebra Booleana, por meio da lógica proposicional, a porta NAND é um dos operadores que pode expressar todas as outras funções Booleanas. As portas lógicas NAND, com dois ou mais valores de entrada, são encontradas em circuitos integrados CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*), além de outras estruturas. O símbolo, a equação Booleana e resultados das operações estão indicados na Figura 14 e Tabela 4 [21], [27], [92, 93, 94].

Figura 14. Símbolo e equação Booleana para a porta lógica NAND.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Tabela 4. Tabela verdade para a porta lógica NAND.

A	B	D
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

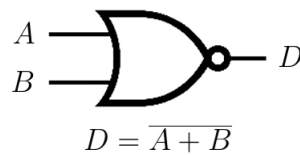
Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

3.1.5 Porta Lógica NÃO OU (NOR *Logic Gate*)

A porta lógica NOR resulta em uma saída que é o inverso da saída resultante da porta OR, desta forma, a sua saída resulta sempre no valor lógico ‘1’ desde que todos os valores de entrada sejam iguais a ‘0’. Em caso contrário, se pelo menos um dos valores lógicos de entrada for igual a ‘1’, então o valor lógico da sua saída será ‘0’. De modo geral, a porta lógica NOR utiliza dois ou mais valores lógicos de entrada, resultando assim em um valor lógico ‘verdadeiro’ se, e somente se, todos os valores lógicos de entrada tiverem um valor ‘falso’ ou ‘0’. Sendo assim, se A e B são duas entradas, então na saída tem-se o resultado da operação $\overline{A + B}$ [92], [97].

A porta NOR é uma porta lógica digital que se comporta de acordo com a sua tabela verdade, conforme Tabela 5. A porta NOR é o resultado da negação da operação da porta lógica OR, caracterizando-se como uma porta universal, o que significa que qualquer outra porta pode ser representada como uma combinação de outras portas NOR. O símbolo, a equação Booleana e resultados das operações estão indicados na Figura 15 e Tabela 5 [92, 93, 94].

Figura 15. Símbolo e equação Booleana para a porta lógica NOR.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Tabela 5. Tabela verdade para a porta lógica NOR.

A	B	D
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

3.1.6 Porta Lógica OU EXCLUSIVO (XOR *Logic Gate*)

A operação XOR pode ser representada pelo símbolo \oplus . Basicamente, a porta lógica XOR compara dois valores e produz uma saída ‘0’, quando todos os *bits* de entrada são iguais, e produz uma saída lógica ‘1’ quando os *bits* de entrada são diferentes. Em outras palavras, a operação da porta lógica XOR, também conhecida como disjunção exclusiva, produz uma saída que é o inverso da saída produzida pela porta NXOR [12].

De modo geral, a operação da porta lógica XOR utiliza dois ou mais valores lógicos de entrada, resultando assim em um valor lógico ‘verdadeiro’ se, e somente se, todos os valores lógicos de entrada tiverem pelo menos um valor ‘verdadeiro’ e um valor ‘falso’. Portanto, se A e B são duas entradas lógicas, então na saída tem-se o resultado da operação $A \oplus B$ [12], [92].

As portas lógicas XOR são reconhecidas nos circuitos integrados CMOS, entre outros tipos de circuitos. Além do mais, existem circuitos integrados que utilizam a porta XOR, de modo que esta mesma operação lógica pode ser expressa por meio das portas NOT, NOR e NAND [12], [92].

Existem expressões algébricas representativas para a porta lógica XOR, entre as quais, tem-se a expressão $\bar{A} \cdot B + A \cdot \bar{B}$, sendo equivalente à expressão $A \oplus B$, com as duas entradas iniciais A e B . Além do mais, as expressões algébricas $(A + B) \cdot (\bar{A} + \bar{B})$ e $(A + B) \cdot (\bar{A} \cdot \bar{B})$, também representam a porta lógica XOR para as entradas A e B . O comportamento da porta XOR para as duas entradas iniciais A e B , é resumido na sua tabela verdade, conforme a Tabela 6. O símbolo e a equação Booleana para a porta XOR são apresentados pela Figura 16 [12], [92, 93, 94].

Figura 16. Símbolo e equação Booleana para a porta lógica XOR.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Tabela 6. Tabela verdade para a porta lógica XOR.

A	B	D
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

3.1.7 Porta Lógica NÃO OU EXCLUSIVO (NXOR *Logic Gate*)

A operação NXOR pode ser representada pelo símbolo \odot . Basicamente, a porta lógica NXOR compara dois valores e produz uma saída ‘0’, quando todos os *bits* de entrada forem diferentes, e produz uma saída lógica ‘1’ quando os *bits* de entrada forem iguais ou coincidentes [12].

Em outras palavras, a operação da porta lógica NXOR, também conhecida como função coincidência ou bicondicional, produz uma saída que é o inverso da saída produzida pela porta XOR [12], [92].

Em geral, a operação da porta lógica NXOR utiliza dois ou mais valores lógicos de entrada, resultando assim em um valor lógico ‘verdadeiro’ se, e somente se, todos os valores lógicos de entrada forem ‘verdadeiro’ ou ‘falso’. Dessa forma, sua saída será igual a ‘1’ quando as suas entradas iniciais tiverem o mesmo valor, e será ‘0’ quando as suas entradas iniciais tiverem valores diferentes. Portanto, se A e B são duas entradas, então na saída tem-se o resultado da operação $A \odot B$ [12], [92].

Existem outras expressões algébricas representativas para a porta lógica NXOR, entre as quais, podemos citar por exemplo as expressões $\overline{A \oplus B}$ ou também $(A + \overline{B}) \cdot (\overline{A} + B)$, sendo equivalentes à expressão algébrica $A \odot B$, com as duas entradas iniciais A e B . De modo geral, o comportamento da porta lógica NXOR para as duas entradas iniciais A e B , é resumido na sua tabela verdade, conforme a Tabela 7. O símbolo e a equação Booleana para a porta NXOR são apresentados pela Figura 17 [12], [92, 93, 94].

Figura 17. Símbolo e equação Booleana para a porta lógica NXOR.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Tabela 7. Tabela verdade para a porta lógica NXOR.

A	B	D
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

3.2 Roteadores de Comprimento de Onda

Os roteadores de comprimento de onda baseados em elétrons são dispositivos que gerenciam o roteamento dos sinais de dados baseando-se nos seus comprimentos de onda, utilizando principalmente componentes eletrônicos [98–102].

As primeiras pesquisas concentraram-se em alavancar os circuitos eletrônicos para manipular e direcionar sinais, o que era eficaz, mas enfrentava limitações em termos de velocidade e largura de banda [98], [99].

Conforme a tecnologia avançava, os pesquisadores começaram a explorar o potencial dos roteadores de comprimento de onda baseados em fótons. Esta mudança foi amplamente motivada pelas vantagens inerentes dos sinais ópticos, tais como maiores taxas de dados e menor degradação do sinal em grandes distâncias. As tecnologias fotônicas utilizam luz em vez de sinais elétricos, permitindo um roteamento de dados mais rápido e eficiente. Essa transição marcou uma evolução significativa no campo, levando ao desenvolvimento de sistemas de roteamento mais sofisticados [98–110].

De fato, os roteadores de comprimento de onda são componentes essenciais em redes ópticas, permitindo um roteamento eficiente dos sinais ópticos baseando-se em seus comprimentos de onda de entrada. Com os recentes avanços tecnológicos, uma nova geração de roteadores de comprimento de onda surgiu, utilizando cristais fotônicos bidimensionais em vez da tecnologia tradicional [99, 100, 110].

O *design* dos roteadores baseados em cristais fotônicos apresentam diversas vantagens, entre as quais, estas estruturas podem atingir uma maior largura de banda, uma alta escalabilidade, um controle preciso sobre a propagação dos sinais, permitindo um roteamento de sinal aprimorado, além de reduzir a perda de informações. Estas vantagens tornam essas estruturas uma solução promissora para o futuro das redes de comunicação óptica de alta velocidade, pois significam melhores taxas de largura de banda e de transmissão de dados, que são cruciais para sistemas de comunicação modernos. De modo geral, a utilização dos cristais fotônicos 2D abre caminho para redes de comunicações ópticas mais rápidas, mais eficientes e mais confiáveis [98, 99, 100].

Os circuitos integrados fotônicos estão assumindo o papel de maior importância no setor de comunicações. O aumento da complexidade dos padrões existentes e em rápida evolução para as Redes Ópticas Passivas (PONs – *Passive Optical Networks*) sugere que a introdução de PICs será o próximo passo para a optoeletrônica relacionada às redes PONs [98–101].

Os PICs avançaram muito nos últimos anos, tornando-se uma solução que pode lidar com os requisitos da indústria e da academia, além de apresentar a flexibilidade de combinar várias plataformas disponíveis para soluções comerciais viáveis. As redes fotônicas integradas permitem uma eficiente comunicação de dados entre os diferentes núcleos em arquiteturas do tipo CMP (CMP – *Chip Multiprocessador*) [102, 103, 104].

Em uma rede fotônica *on-chip* (PNoCs – *Photonic Networks-on-Chip*) [105], os diferentes componentes devem ser montados no mesmo *chip*, entre os quais, cita-se os multiplexadores e demultiplexadores [106], os filtros [107] e *switches* [108], [109].

Com efeito, o componente fundamental necessário para se conseguir o roteamento do sinal óptico entre N transmissores e N receptores é o *switch* que atua como o bloco de construção básico, que pode ser replicado várias vezes dentro da rede [109]. Sendo assim, os caminhos dos sinais dentro de uma mesma rede podem ser configurados escolhendo-se adequadamente os estados dos diferentes *switches* na estrutura [98], [100–110].

No projeto de uma rede de comunicação fotônica em *chip*, podem ser utilizados os componentes ativos ou passivos. De fato, as redes que exploram os componentes ativos são reconfiguráveis por meio da variação do estado dos componentes, uma vez que os caminhos dos sinais podem ser definidos dinamicamente pelas tensões que são aplicadas. Por sua vez, a tensão aplicada induz uma variação do índice de refração que caracteriza a estrutura, e pode causar uma variação do estado do comutador [98, 110, 111].

No caso da utilização dos componentes passivos, nos quais o roteamento do sinal é realizado pelo mecanismo do comprimento de onda de ressonância, isto significa que o caminho a ser percorrido pelo sinal é definido pelo comprimento de onda do sinal óptico de entrada, de acordo com as ressonâncias dos dispositivos encontrados ao longo do caminho. Sendo assim, todos os caminhos possíveis para a estrutura são previamente definidos no momento do *design* da topologia da rede, e os *links* entre as entradas e saídas possíveis são obtidos alterando-se o comprimento de onda do sinal de entrada [98, 111, 112].

A tecnologia mais investigada é provavelmente baseada em componentes convencionais de guias de onda de silício sobre isolante (SOI), e baseada em anéis ressoadores, devido à sua maturidade [110]. No contexto das NoCs (*Networks-on-Chip*), a investigação de componentes baseados em cristais fotônicos para as redes ópticas roteadas por comprimento de onda em *chip* (WRONoC – *Wavelength-Routed Optical Network-on-Chip*) é ainda recente. Os cristais fotônicos podem ser considerados como uma tecnologia alternativa em relação às estruturas de guias de onda convencionais, uma vez que praticamente qualquer componente pode ser implementado em ambas as tecnologias [112–122].

As redes ópticas em *chip* (ONoCs – *Optical Networks-on-Chip*) foram propostas inicialmente como uma solução para os requisitos cada vez maiores de integração de grandes projetos de sistemas baseados em *chip*. Diferentemente dos sinais elétricos, a utilização da luz para enviar dados entre os guias de onda, requer os seguintes componentes principais para o plano de roteamento óptico [123]:

- a) transmissores dos sinais ópticos em cada guia de onda da rede óptica;
- b) receptores dos sinais ópticos;
- c) guias de onda de cristais fotônicos atuando como os meios de transmissão e recepção; e
- d) elementos de roteamento óptico para a transferência dos sinais ópticos entre os guias de onda da rede.

As redes passivas utilizam os elementos de roteamento óptico, ou simplesmente OREs (OREs – *Optical Routing Elements*), que ressoam com frequências diferentes, de modo que uma informação seja roteada passivamente de acordo com o comprimento de onda da luz portadora no ORE, no momento de sua passagem [123]. Sendo assim, os sistemas ONoCs passivos também são denominados ONoCs roteados por comprimento de onda (*Wavelength-Routed ONoCs*) ou simplesmente WRONoCs [125]. Neste trabalho, será utilizado a categoria principal de redes passivas, em que as estruturas propostas terão os seus elementos projetivos, tais como os guias de onda e os anéis ressoadores, baseados em cristais fotônicos bidimensionais.

Nas redes ONoCs, o elemento de roteamento óptico é o anel ressoador (PhCRR). Para os propósitos desta tese, diferentemente da tecnologia convencional, os elementos de roteamento (OREs) possuem uma estrutura circular formada por hastes dielétricas de silício, cujos os raios internos definem a frequência de ressonância. Assim, um sinal de luz com um determinado comprimento de onda propagando-se em um guia de ondas próximo a um PhCRR com uma frequência de ressonância correspondente será acoplado ao PhCRR adjacente e movido para o outro guia de ondas ortogonal, também próximo a este mesmo PhCRR [126].

O fator de qualidade (*Q-factor*) de cavidades formadas por PhCRRs é limitado por perdas de radiação, além de ser afetado pela rugosidade da superfície. Nestas cavidades formadas por cristais fotônicos, os modos ressonantes são suportados pelo PBG da estrutura, que é mais eficiente em confinamento óptico do que o fenômeno da reflexão interna total [38, 39, 99].

Com efeito, os roteadores ópticos compactos são módulos essenciais para as redes NoCs (*Networks-on-Chip*) fotônicas. O roteamento sem bloqueio é obtido estipulando-se os PhCRRs e posicionando-os simetricamente nos cantos e nos cruzamentos do roteador, de forma que todos os sinais de entrada possam ser encaminhados para as suas portas de saída pretendidas.

O *design* dos roteadores incorporam vários PhCRRs e cruzamentos de guias de onda em banda larga. Para cada guia de onda, há uma interseção com cada um dos guias de onda ortogonais (nó) [123]. Como resultado deste *design*, os quatro guias de onda de cruzamento ortogonal formam uma estrutura de verificação básica do tipo 2×2 , em que se pode atestar os funcionamentos das ressonâncias nos PhCRRs.

Neste trabalho, faz-se uma análise das simulações numéricas realizadas em uma configuração específica de uma estrutura do tipo 4×4 , obtida pela montagem dos quatro elementos básicos de comutação do tipo 2×2 , de forma a destacar a potencialidade do elemento básico de roteamento para ser utilizado na montagem de matrizes compactas de ordem superior, e que apresentam pequenas medidas, em um *wafers* cujas dimensões são de apenas $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$.

Nas implementações numéricas deste trabalho, os componentes convencionais tais como, os guias de onda e os cruzamentos de guias de onda, curvas e anéis ressoadores, são totalmente substituídos por estruturas equivalentes que são baseadas em cristais fotônicos bidimensionais.

Para o GWOR (*Generic Wavelength-Routed Optical Router*) passivo, o roteamento sem bloqueio é realizado atribuindo-se aos PhCRRs um posicionamento para os cantos apropriados das interseções/nós de guias de onda, para que todos os sinais de entrada possam ser direcionados para as suas portas de saída específicas. Além do mais, considera-se a condição em que nenhuma autocomunicação é permitida, ou seja, o sinal de entrada P_i , não seguirá para a saída P_i , $i \in \{1, 2, 3, 4\}$, de modo que existem 12 pares de entrada/saída possíveis. Considerando que quatro pares ($P_1 \rightarrow P_3$, $P_2 \rightarrow P_4$, $P_3 \rightarrow P_1$, $P_4 \rightarrow P_2$) são conectados diretamente pelos quatro guias de onda, então são necessários pelo menos oito PhCRRs para realizar o roteamento dos oito pares ($P_1 \rightarrow P_2$, $P_1 \rightarrow P_4$, $P_2 \rightarrow P_1$, $P_2 \rightarrow P_3$, $P_3 \rightarrow P_4$, $P_3 \rightarrow P_2$, $P_4 \rightarrow P_3$, $P_4 \rightarrow P_1$) restantes, para a estrutura 4×4 com cruzamentos ortogonais de guias de onda.

Ao contrário do que ocorre com as redes ONoCs ativas, as redes ONoCs passivas utilizam o comprimento de onda do sinal óptico de entrada para o roteamento. Desta forma, o caminho do sinal óptico é definido de acordo com o *design*, por meio da origem do sinal no roteador e por seu comprimento de onda. Esta abordagem para o roteamento elimina qualquer latência devido à configuração do caminho da onda, sendo comum em ONoCs ativos. De fato, vários sinais podem utilizar o mesmo comprimento de onda, mas a WRONoC é sempre projetada de modo que não haja dois sinais na estrutura utilizando o mesmo comprimento de onda, com o intuito de que não ocorra caminhos em colisão [125].

O projeto da topologia lógica almeja a criação de roteadores como o λ -router ou GWOR, para que a matriz de comunicação seja cumprida. A matriz de comunicação é dada pelos requisitos de comunicação de um SoC (SoC – *System on Chip*) [123].

A matriz de comunicação é uma matriz binária quadrada, isto é,

$$CM_{i,j} \in \mathbb{R}^{N \times N}, \quad (3.1)$$

com N denotando o número de nós da rede, em que

$$CM_{i,j} = 1, \quad (3.2)$$

se o nó i precisar enviar as informações para o nó j . Isto significa conectar os transmissores aos receptores, conectando os guias de onda com os anéis ressoadores (PhCRRs), além de selecionar os comprimentos de onda específicos para os PhCRRs de acordo com o *design* da WRONoC [123], [125].

3.2.1 *Design* de Redes Fotônicas

Existem algumas regras fundamentais para o *design* de roteadores WRONoC [123]. Em geral, qualquer roteador WRONoC deve obedecer às três regras a seguir:

- a) Os sinais ópticos não podem ter comprimentos de onda iguais e caminhos de colisão;
- b) Cada transmissor deve enviar todos os sinais ópticos em diferentes comprimentos de onda;
- c) Todo receptor deve receber todos os seus sinais ópticos em diferentes comprimentos de onda.

A regra a) garante a ausência de conflitos. A regra b) existe para que um transmissor possa enviar cada sinal óptico para um receptor diferente, e a regra c) existe para que cada receptor possa distinguir de qual transmissor cada sinal óptico foi enviado. Dependendo dos requisitos de comunicação e do *design* físico do roteador, cada nó da rede pode ter zero, um ou mais transmissores e receptores [125, 126, 127].

3.2.2 Elementos de Comutação Fotônica (PSEs)

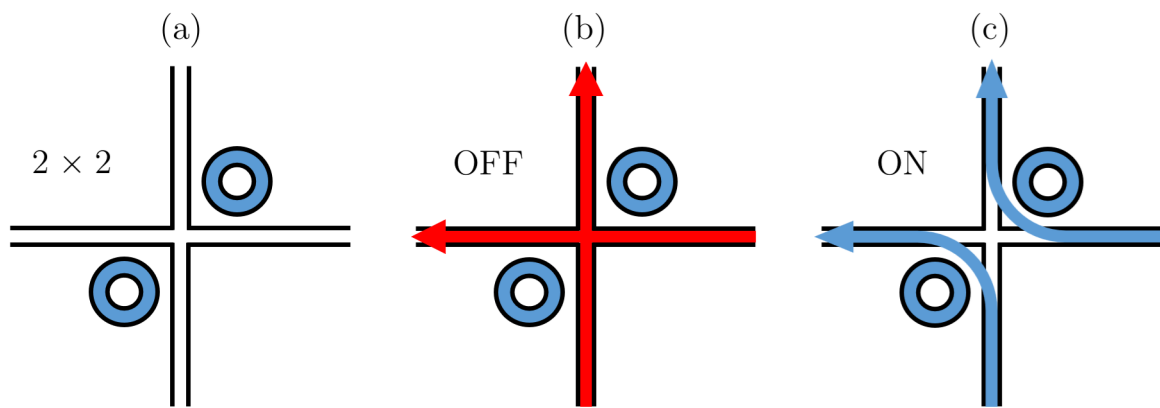
O bloco de construção fundamental para as redes WRONoC, são os elementos de comutação fotônica de banda larga, os PSEs (*Photonic Switching Elements*), que são constituídos por dois tipos de estruturas que funcionam conjuntamente, os guias de onda e os anéis ressoadores. Este bloco de construção fundamental é essencialmente formado por uma interseção ortogonal entre guias de onda que são adequadamente posicionados entre dois anéis ressoadores, como é o caso de uma estrutura 2×2 , conforme ilustrado na Figura 18 (a) [127].

Considera-se ainda dois estados possíveis, o estado OFF e o estado ON. No estado OFF, a frequência de ressonância dos anéis PhCRRs é diferente do comprimento de onda no qual o fluxo de dados ópticos é transmitido, então a luz passa pela interseção de guias de onda ininterrupta, como se fosse um cruzamento passivo de guias de onda, conforme ilustrado na Figura 18 (b). No estado ON, a ressonância dos anéis PhCRRs muda de tal maneira, que a luz transmitida a partir do guia de onda de entrada, agora em ressonância, é acoplada aos PhCRRs proporcionando uma rotação em um ângulo reto, criando assim uma ação de comutação entre os guias de onda, vertical e horizontal, ou reciprocamente, conforme ilustrado na Figura 18 (c).

De fato, a maioria dos projetos de roteadores WRONoC encontrados na literatura são formados com as múltiplas estruturas de PSEs do tipo 1×2 ou 2×2 [98], [99]. No âmbito deste trabalho, trataremos de um cruzamento ortogonal entre dois guias de onda baseados em cristais fotônicos, em que dois PhCRRs estão presentes na estrutura, conforme mostrado na Figura 18 (a).

No caso de um PSE do tipo 2×2 , ambos os anéis PhCRRs apresentam os mesmos raios internos e, portanto, apresentam as mesmas frequências de ressonância, implicando assim no funcionamento típico de roteamento descrito nas Figuras 18 (b) e (c). De fato, ao conectar diversas estruturas formadas por PSEs, entre os transmissores e receptores de diferentes caminhos possíveis, então diferentes topologias lógicas de roteadores WRONoC são possíveis.

Figura 18. PSE, estrutura e roteamento: (a) PSE 2×2 ; (b) Estado OFF: os caminhos ópticos para os comprimentos de onda que não estão em ressonância com os dois PhCRRs, em um cruzamento de guias de onda passivo; (c) Estado ON: os caminhos ópticos para os comprimentos de onda em ressonância com os PhCRRs, isto é, a luz é acoplada aos PhCRRs e compelida a girar. As cores (azul e vermelha) nas Figuras 18 (a), (b) e (c) indicam os comprimentos de onda utilizados na estrutura.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

3.2.3 Elementos de Roteamento Óptico (ORE)

Os elementos de roteamento óptico (OREs – *Optical Routing Elements*) utilizados nas ONoCs são os ressoadores PhCRRs, sendo microestruturas de silício em um formato circular [98]. De fato, cada PhCRR ressoa com um específico comprimento de onda. Os valores específicos para os comprimentos de onda de ressonância dependem das propriedades dos materiais e das propriedades estruturais ou geométricas dos PhCRRs que compõem a estrutura, entre as quais, o parâmetro estrutural mais relevante, é o raio das hastes dielétricas [126].

3.2.4 Topologias Lógicas WRONoC

O projeto de um roteador WRONoC é um processo de otimização com dois aspectos a serem considerados: a topologia lógica e o *layout* físico do roteador. O primeiro aspecto atribui um comprimento de onda a cada mensagem e a cada PhCRR, além de também

conectar os cruzamentos por meio dos guias de onda e PhCRRs, de forma que a matriz de comunicação, que especifica os requisitos de comunicação necessários entre os nós, seja atendida. O segundo aspecto roteia estes elementos no plano óptico enquanto considera as posições físicas dos nós e as restrições relacionadas ao posicionamento físico dos guias de onda [125, 126, 127].

Os projetos lógicos de redes ópticas passivas utilizam os PSEs como blocos básicos construtivos para o projeto de diversas configurações possíveis para o roteador óptico genérico GWOR (GWOR – *Generic Wavelength-Routed Optical Router*), desde que os requisitos que são necessários para uma comunicação completa na estrutura sejam atendidos, excetuando a autocomunicação. De fato, os ONoCs passivos utilizam o comprimento de onda do sinal óptico para o roteamento, daí o termo ‘*Wavelength-Routed*’. A rede WRONoC é sempre projetada de forma que dois sinais que utilizam o mesmo comprimento de onda não tenham caminhos de colisão. O determinismo do projeto fornece às redes WRONoCs um desempenho garantido [126], [127].

Considerando os objetivos desta tese, e considerando a grande variedade de projetos possíveis para as redes ópticas roteadas por comprimento de onda, apresenta-se algumas propriedades básicas que caracterizam os projetos possíveis de roteadores ópticos GWOR, com o intuito de que a matriz de comunicação seja cumprida na estrutura. Isto significa conectar os N transmissores aos N receptores da estrutura final, e assim, conectando os dois componentes baseados em cristais fotônicos, ou seja, os guias de onda e os anéis ressoadores, selecionando os comprimentos de onda de ressonância, os mesmos para ambos os componentes, de acordo com regras específicas que são utilizadas para o *design* de redes WRONoCs por meio de PSEs [126]. As propriedades a seguir se referem a roteadores GWOR com um número par de portas de Entradas/Saídas.

Definição 1 *Para um roteador GWOR do tipo $N \times N$ ($N = 2n, n \geq 2$), o número total de anéis PhCRRs utilizados é*

$$N(N - 2).$$

Definição 2 *O número total de anéis PhCRRs distintos com os raios das hastes internas $r_1, r_2, r_3, \dots, r_{N-2}$, sendo utilizados em um roteador GWOR do tipo $N \times N$ ($N = 2n, n \geq 2$), é igual a $N - 2$, e são correspondentes aos respectivos comprimentos de onda de ressonância $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_{N-2}$.*

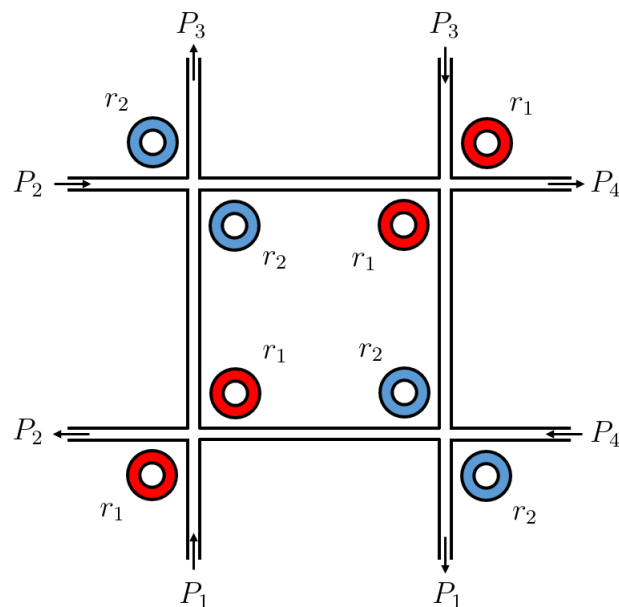
Definição 3 *Um roteador GWOR do tipo $N \times N$ ($N = 2n, n \geq 2$), conecta N transmissores a N receptores, e precisa de apenas*

$$\frac{N}{2}(N - 2)$$

PSEs do tipo 2×2 , e $N - 1$ comprimentos de onda. Isto é devido ao fato desta topologia não suportar a autocomunicação, ou seja, cada transmissor tem exatamente um receptor para o qual não pode enviar sinais ópticos.

No caso do roteador GWOR do tipo 4×4 ($N = 4, n = 2$), analisado numericamente neste trabalho, teremos que o número total de PhCRRs a serem utilizados será 8. O número total de PhCRRs distintos a serem utilizados é 2, com os raios das hastes internas r_1 e r_2 sendo correspondentes aos seus respectivos comprimentos de onda de ressonância λ_1 e λ_2 . O roteador 4×4 precisa de apenas 4 PSEs do tipo 2×2 , e de apenas 3 comprimentos de onda operacionais, ou seja, λ_1, λ_2 e λ_3 . A Figura 19 ilustra a estrutura final, caracterizada como um bloco básico de construção para construir GWORs de tamanho superior.

Figura 19. Estrutura do roteador GWOR do tipo 4×4 formado por 4 PSEs do tipo 2×2 . As cores vermelha e azul indicam os comprimentos de onda λ_1 e λ_2 .



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

4 MÉTODOS NUMÉRICOS

Neste capítulo, serão apresentados os métodos utilizados nas simulações numéricas, para a análise das estruturas que são propostas. A propagação de ondas eletromagnéticas em cristais fotônicos é analisada utilizando-se das equações diferenciais de Maxwell [1]. Existem muitos métodos utilizados para analisar o comportamento de dispersão e espectros de transmissão em cristais fotônicos, tais como o método da expansão em ondas planas (PWE) [44, 45, 128, 129], o método da matriz de transferência (TMM – *Transfer Matrix Method*) [130], o método da função de Green, o método dos elementos finitos ou FEM (FEM – *Finite Element Method*) e o método de diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) [131], [132]. Cada método tem as suas vantagens e desvantagens.

Neste trabalho, foram utilizados, principalmente, os métodos PWE e FDTD, para analisar as estruturas ópticas propostas, baseadas em cristais fotônicos 2D. Tipicamente, o método PWE é utilizado para calcular a banda proibida e os modos de propagação da estrutura periódica, enquanto que o método FDTD é utilizado para se calcular o espectro de transmissão e a distribuição de campo elétrico, sendo baseado nas soluções numéricas das equações diferenciais de Maxwell. O método FDTD é baseado no algoritmo de Yee [133], utilizado para o estudo de cristais fotônicos, uma vez que as exigências de tempo e memória computacionais são bastante reduzidas [133], [134]. Para este efeito, o *software* OptiFDTD, ferramenta de *design* e simulações da *Optiwave Systems Inc.*, é utilizado para a concepção e simulação de algumas configurações de estruturas baseadas em cristais fotônicos, para duas aplicações: uma estrutura de porta lógica totalmente óptica e estruturas de roteadores de comprimento de onda para funcionamento como blocos básicos de montagens de estruturas de ordem superior.

4.1 As Equações de Maxwell

Modelar matematicamente as propriedades ópticas e elétricas, além de vários fenômenos eletromagnéticos, tais como o guiamento de ondas no interior de estruturas periódicas ou em dispositivos fotônicos, é possível utilizando-se das equações diferenciais de Maxwell [1]. Para uma região linear, homogênea e isotrópica, as equações de Maxwell, na forma diferencial, são dadas por

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = J + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (4.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4.4)$$

em que \vec{E} e \vec{H} são respectivamente os vetores intensidade de campo, elétrico e magnético; \vec{D} e \vec{B} são os vetores densidade de fluxo elétrico e de indução magnética, respectivamente; J é a densidade de corrente elétrica, e ρ é a densidade de cargas elétricas.

Os vetores indução magnética e densidade de fluxo elétrico estão relacionados aos campos magnético e elétrico, respectivamente, através das seguintes equações constitutivas

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (4.5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad (4.6)$$

em que os termos μ e ε são as constantes dielétricas do material utilizado, respectivamente, a permeabilidade magnética e a permissividade elétrica. No espaço livre, a permeabilidade magnética μ_0 e a permissividade elétrica ε_0 são respectivamente:

$$4\pi \cdot 10^{-7} \text{Henry/m}$$

e

$$8,854 \cdot 10^{-12} \text{Farad/m}$$

Considerando a maioria dos materiais dielétricos, interessantes para aplicações, tem-se $\mu \simeq 1$, e nestes casos, o índice de refração do material é dado por $n = \sqrt{\varepsilon}$.

Agora, assumindo as relações constitutivas (4.5–4.6), e supondo que o material é linear, isotrópico, periódico e sem perdas, então as equações de Maxwell dadas em (4.1–4.4) podem ser reescritas por

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (4.7)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4.8)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (4.9)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (4.10)$$

Os campos elétrico e magnético são funções do espaço e tempo. As equações de Maxwell são lineares, de modo que a dependência espacial pode ser separada da dependência temporal escrevendo-se os campos \vec{E} e \vec{H} em modos harmônicos, e em termos de uma exponencial complexa

$$\vec{H}(r, t) = \vec{H}(r)e^{-i\omega t} \quad (4.11)$$

$$\vec{E}(r, t) = \vec{E}(r)e^{-i\omega t} \quad (4.12)$$

em que ω é a frequência angular, e $\vec{H}(r)$ e $\vec{E}(r)$ são as autofunções da equação da onda.

Agora, substituindo as equações (4.11–4.12) nas equações (4.7–4.10), os perfis de modo para qualquer [135] frequência pode ser dado pelas equações

$$\nabla \times \vec{E}(r) = i\omega\mu_0\vec{H}(r) \quad (4.13)$$

$$\nabla \times \vec{H}(r) = -i\omega\varepsilon_0\varepsilon_r\vec{E}(r) \quad (4.14)$$

$$\nabla \cdot \vec{E}(r) = 0 \quad (4.15)$$

$$\nabla \cdot \vec{H}(r) = 0 \quad (4.16)$$

Para dissociar as duas equações (4.13–4.14), podemos multiplicá-las por $1/\varepsilon_r$, aplicar o rotacional e utilizar a relação da velocidade da luz c com as constantes ε_0 e μ_0 , para obter duas equações para as autofunções $\vec{H}(r)$ e $\vec{E}(r)$, ou seja,

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\varepsilon_r} \nabla \times \vec{H}(r) \right] = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{H}(r) \quad (4.17)$$

$$\frac{1}{\varepsilon_r} \nabla \times \nabla \times \vec{E}(r) = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{E}(r) \quad (4.18)$$

em que ω é a auto frequência angular e c é a velocidade da luz no espaço livre, dada por

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \quad (4.19)$$

Para a obtenção dos modos, será considerada a equação (4.17), que é denominada de equação mestra (*master equation*) [1]. Trata-se de um problema de autovalores.

4.2 O Método PWE

O método PWE foi utilizado para a análise teórica das estruturas fotônicas. O diagrama de banda é a representação da estrutura de banda de cristais fotônicos, e fornece os modos de propagação e a banda proibida. A banda PBG é a característica principal dos dispositivos fotônicos, e pode ser observada utilizando-se dos diagramas de banda obtidos pelo método PWE. Este pode ser aplicado a ambos os campos elétricos e magnéticos. Sendo assim, o PBG é diferente para o modo transversal elétrico (TE) e transversal magnético (TM). As estruturas projetadas produzem um *band gap* no modo TE, como será calculado no capítulo seguinte. O cálculo da banda proibida depende de parâmetros tais como, o tamanho da estrutura e a constante dielétrica. Ambos os parâmetros são os mesmos para as duas aplicações propostas e, portanto, a faixa do *band gap* também é semelhante.

O cálculo do diagrama de bandas é determinado pela solução das equações de Maxwell [135], [135], por meio da equação (4.17) da seção anterior. Esta banda proibida é utilizada para determinar a frequência operacional da estrutura periódica. Esta frequência normalizada da estrutura de cristal fotônico é dada por

$$\frac{\omega}{2\pi c} = \frac{1}{\lambda} \quad (4.20)$$

em que ω é a frequência angular, c é a velocidade da luz no vácuo e λ é o comprimento de onda de operação.

A equação de Maxwell em um meio invariante no tempo, não magnético e livre de fontes é dada conforme a equação mestra em (4.17). Com base no teorema de Bloch [1], e devido à periodicidade, o campo magnético assumirá a forma do autovetor \vec{H}_k

$$\vec{H}_k(r) = e^{ik \cdot r} \vec{u}_k(r), \quad (4.21)$$

em que $\vec{u}_k(r) = \vec{u}_k(r + R)$, para todos os vetores de rede R . A equação mestra em (4.17) pode ser escrita em termos de operador, ou seja,

$$(ik + \nabla) \times \frac{1}{\varepsilon_r} (ik + \nabla) \times \vec{u}_k(r) = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{u}_k(r), \quad (4.22)$$

ou simplesmente,

$$\hat{\Theta}_k \vec{u}_k(r) = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{u}_k(r), \quad (4.23)$$

em que $\hat{\Theta}_k$ é o operador Hermitiano dependente de k em destaque

$$\hat{\Theta}_k \triangleq (ik + \nabla) \times \frac{1}{\varepsilon_r} (ik + \nabla) \times \quad (4.24)$$

A equação fundamental (4.22) é transformada em um problema finito expandindo o campo magnético em uma base finita de ondas planas simples. O resultado da resolução do problema discretizado é a relação de dispersão entre as frequências dos modos além do vetor de onda, sendo geralmente plotado na forma de um diagrama de bandas [128].

4.3 O Método FDTD

O método FDTD é o mais comum para resolver as equações de Maxwell, sendo baseado no algoritmo de Yee, onde as equações de Maxwell podem ser discretizadas no espaço e no tempo pela técnica das células Yee [133]. A propagação de ondas eletromagnéticas através da estrutura de cristal fotônico é governada pelas quatro equações de Maxwell em sua forma linear, como mostradas nas equações (4.7–4.10). O método FDTD será utilizado para a simulação e otimização das estruturas que serão tratadas nos capítulos 5 e 6, por meio do cálculo da energia de transmitância nas portas de saída.

Nas simulações, deve-se considerar as condições de fronteiras absorventes na estrutura simulada, que é isolada de modo a não sofrer interferência externa e interna, ou relacionadas com os fenômenos físicos que ocorrem durante as simulações, tais como a dispersão do feixe de luz no interior das cavidades e as reflexões, que devem ser evitadas por esta técnica para que se tenha resultados mais consistentes. Sendo assim, as camadas perfeitamente casadas PML (PML – *Perfectly Matched Layers*) [136] foram utilizadas com o intuito de suprimirem estes fenômenos, uma vez que são camadas absorventes [135], [136]. Por meio das simulações numéricas foi possível ver os efeitos de reflexão, difração e refração na onda durante o defrontamento com a estrutura PBG [65], [128], além do efeito de absorção da PML simulando o infinito.

Para o caso 2D TE, propagação ao longo da direção z , apenas H_x , E_y e H_z possuem componentes não nulas. As equações diferenciais de Maxwell [132], [133] para o modo transversal elétrico (2D TE FDTD) utilizado neste trabalho são dadas por

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (4.25)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (4.26)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (4.27)$$

em que $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ é a permissividade dielétrica do material e μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo.

As equações de Maxwell podem ser discretizadas no espaço e no tempo utilizando-se a técnica das células de Yee. Os campos propagados e gerados por meio da aplicação do método FDTD, são os campos no domínio do tempo. As células devem ser pequenas o suficiente para representarem a distribuição do material e fornecerem resultados com o detalhamento desejado, evitando assim o efeito de dispersão. O tamanho dos passos de tempo e de espaço são restrições fundamentais no método FDTD.

A propagação da onda eletromagnética (EM 2D) no espaço real e na estrutura isotrópica linear, é baseada no passo de tempo do método FDTD. As equações (4.25–4.27) podem ser discretizadas em uma região livre e variante de tempo utilizando-se das células de Yee. As dimensões espaciais das equações (4.25–4.27) são divididas em uma malha discreta de duas dimensões, com passo de tempo diferencial no sistema de coordenadas xz do modo polarização TE [133]. O análogo discreto das equações diferenciais de Maxwell pode ser definido utilizando-se do teorema central das diferenças finitas, tanto no espaço quanto no tempo, pelas equações

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, k + 1/2) = H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, k + 1/2) + \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta z} [E_y^n(i, k + 1) - E_y^n(i, k)] \quad (4.28)$$

$$H_z^{n+\frac{1}{2}}(i + 1/2, k) = H_z^{n-\frac{1}{2}}(i + 1/2, k) - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x} [E_y^n(i + 1, k) - E_y^n(i, k)] \quad (4.29)$$

$$E_y^n(i, k) = E_y^{n-1}(i, k) + \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta z} [H_x^{n-1/2}(i, k + 1/2) - H_x^{n-1/2}(i, k - 1/2)] \quad (4.30)$$

$$- \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta x} [H_z^{n-1/2}(i + 1/2, k) - H_z^{n-1/2}(i - 1/2, k)]$$

nas quais os sobrescritos n indicam o passo de tempo discreto, enquanto que os índices i e k indicam o passo de espaço discreto ao longo das direções x e z , respectivamente. O símbolo Δx representa o tamanho em unidades reais de um passo espacial ao longo da direção x , Δz representa o tamanho em unidades reais de um passo espacial ao longo da direção z e Δt é o tamanho em unidades reais de um passo de tempo.

As desigualdades (4.31) mostram o dimensionamento máximo que as células de Yee podem ter, definindo desta maneira, o nível de discretização da mesma. O tamanho dos passos refere-se a precisão, estabilidade e dispersão do método FDTD [65]. O tamanho dos passos é escolhido de acordo com a seguinte regra

$$\Delta x \leq \frac{\lambda}{10} \quad \text{e} \quad \Delta z \leq \frac{\lambda}{10} \quad (4.31)$$

em que Δx e Δz são os passos de espaço ao longo das direções x e z . A amostragem no tempo é escolhida para garantir a estabilidade numérica do algoritmo [135]. Por sua vez, para simulações 2D, os passos de tempo devem satisfazer a seguinte condição de Courant

$$\Delta t \leq \frac{(\Delta x^{-2} + \Delta z^{-2})^{-\frac{1}{2}}}{c} \quad (4.32)$$

em que Δt é o tamanho do passo de tempo e c é a velocidade da luz no meio. O material é considerado não magnético para as simulações que são realizadas no modo TE.

4.4 Validação do *Software* Utilizado

Existem alguns pacotes de *softwares* comerciais e de código aberto que implementam o método FDTD, entre os quais, o MEEP, OptiFDTD, Ansys Lumerical FDTD e o RSoft. As estruturas propostas neste trabalho são simuladas por meio do método FDTD apenas no plano horizontal, em que uma onda contínua (CW – *Continuous Wave*) se propaga na direção z , enquanto que são consideradas infinitas no plano vertical, caso em que as possíveis perdas de radiação na direção vertical y são devidamente desprezadas. Na excitação CW, a dependência temporal do campo incidente é uma função sinusoidal de frequência única [61]. Por exemplo, o campo E_y incidente tem a seguinte forma

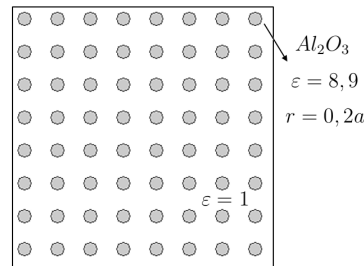
$$E_y^{in}(x, z^{in}) = AF(x, z^{in})\text{sen}(\omega t + \theta_i) \quad (4.33)$$

em que A é a amplitude constante do campo, $AF(x, z^{in})$ é a distribuição transversal do campo na localização do plano incidente z^{in} . O deslocamento de fase inicial θ_i é a diferença de fase entre os pontos no plano de incidência, e pode ser ajustado para definir a direção do campo incidente. A frequência da onda de entrada é $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$. No caso CW, a onda óptica se propaga até atingir o estado estacionário no domínio computacional.

Agora, como um exemplo de utilização e de validação para o *software* OptiFDTD, apresenta-se o cálculo da banda PBG utilizando-se do solucionador de banda PWE, para uma estrutura específica baseada em cristais fotônicos 2D, com o objetivo de comparar o resultado obtido com a referência relacionada [1]. Vamos analisar os cristais fotônicos 2D, com uma rede quadrada, conforme relatado na referência [1]. Primeiramente, criamos a estrutura de rede quadrada com hastes dielétricas de alumina (Al_2O_3), com permissividade $\varepsilon = 8, 9$, e incorporados em ar, com permissividade dielétrica $\varepsilon = 1$, conforme é mostrada na Figura 20. O raio das hastes é $r = 0, 2a$, em que a é a constante de rede quadrada da estrutura, em um *wafers* com dimensões de $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$. Em seguida, prosseguimos com uma simulação simples e obtenção do resultado, conforme ilustrado na Figura 21.

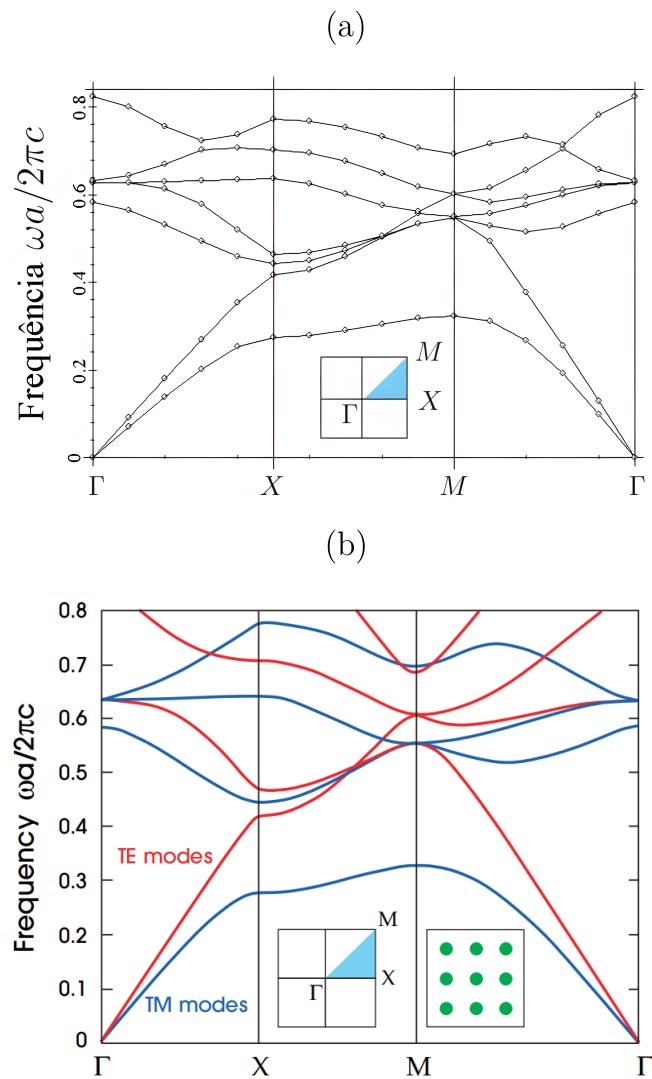
Uma comparação pode ser feita entre os diagramas de banda calculados, conforme ilustrados na Figura 21.

Figura 20. Estrutura fundamental de rede quadrada projetada.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Figura 21. As Figuras (a) e (b) representam a estrutura de banda para uma rede quadrada de hastes dielétricas de alumina, com raio das hastes $r = 0,2a$. Na Figura (a), os modos TE e TM são exibidos com configuração de polarização híbrida, mas sem a distinção dos modos. A Figura (b) foi retirada da referência [1].



Fonte: Adaptado de [1].

5 PORTA LÓGICA TOTALMENTE ÓPTICA

Neste capítulo, encontram-se os resultados referentes às simulações bidimensionais, utilizando uma estrutura baseada em cristais fotônicos em uma rede quadrada de hastes dielétricas.

Os métodos numéricos PWE e FDTD são utilizados para analisar o comportamento da estrutura proposta. O método PWE é utilizado em cristais fotônicos para resolver a estrutura de bandas de geometrias específicas, que no caso deste trabalho, trata-se de uma geometria de rede quadrada. O método 2D FDTD simula a propagação de ondas eletromagnéticas em quaisquer materiais no domínio do tempo.

Neste trabalho será apresentado um novo *design* de uma estrutura muito compacta para ser utilizada como uma porta lógica totalmente óptica com funcionalidade NAND. Além do mais, será apresentado a análise numérica da performance do dispositivo, por meio de diversos parâmetros, entre os quais, cita-se a razão de contraste, um parâmetro fundamental quando se trata da análise de AOLGs. De forma geral, a análise dos resultados demonstra que a estrutura proposta pode contribuir para a densidade de integração de componentes em sistemas de comunicações ópticas de alto desempenho.

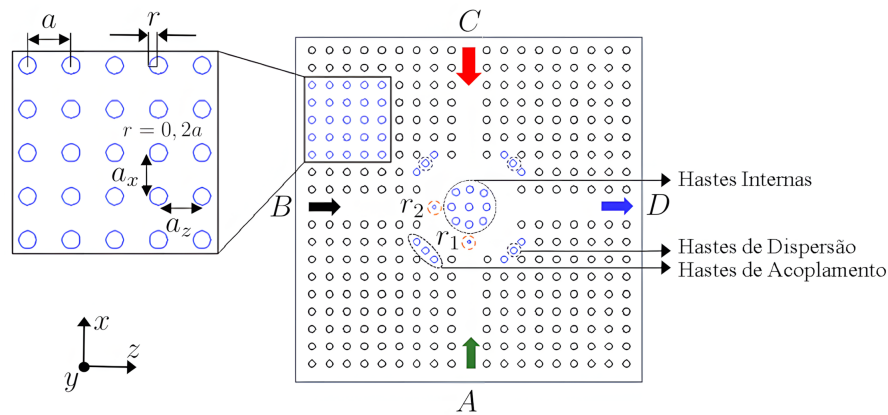
5.1 *Design*, Materiais e Métodos

Conforme é mostrado na Figura 22, propomos uma nova estrutura para um *switch* totalmente óptico composto por dois guias de onda de cristal fotônico 2D, sendo conectados a um PhCRR na parte central. Esta estrutura funciona como uma porta lógica NAND totalmente óptica com base no efeito de interferência dos sinais. Em um sistema 2D, esta estrutura proposta consiste em uma rede quadrada de 19×19 hastes dielétricas de silício (Si) em ar.

A constante de rede, denotada por ' a ', é $0,5943 \mu\text{m}$, sendo a distância entre duas hastes dielétricas consecutivas, conforme mostrado na Figura 22. O raio das hastes de silício é dado por $r = 0,2a$, aproximadamente $0,11886 \mu\text{m}$. A permissividade relativa das hastes dielétricas na estrutura é $\varepsilon_r = 12$, que é equivalente ao índice de refração $n = 3,46$, com $n = \sqrt{\varepsilon_r}$.

A estrutura da porta lógica NAND proposta é formada por um PhCRR em seu interior, que foi incorporado pela inserção de alguns defeitos. Os defeitos pontuais e de linha na estrutura de cristal fotônico foram feitos por meio de hastes dielétricas de silício, que são adicionadas ou removidas da região interna da estrutura no plano xz . O diâmetro do PhCRR central é $d = 6a$.

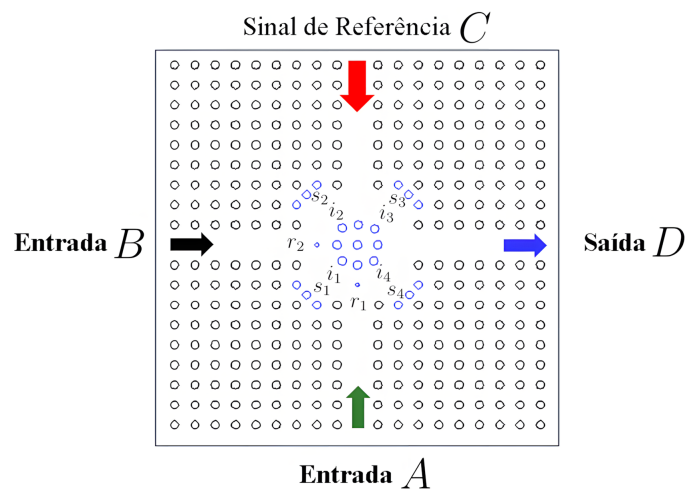
Figura 22. Diagrama esquemático do dispositivo proposto, com a funcionalidade de uma porta lógica NAND totalmente óptica.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

A porta lógica representada na Figura 23, é analisada no plano xz em uma rede quadrada composta por hastes de silício em ar. O tamanho do *wafer* utilizado é de apenas $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$, e a estrutura apresenta um *footprint* muito pequeno para a porta lógica NAND proposta, de cerca de $119,58 \mu\text{m}^2$. Como mostrado na Figura 23, as hastes de dispersão são deslocadas a partir das suas posições originais, ao longo das direções x e z por $0,25a$ em relação à rede original, para se obter uma simetria circular para o PhCRR central, e evitar reflexões inversas devido à curva formada no guia de ondas central. As hastes de dispersão, denotadas por s_1, s_2, s_3 e s_4 , estão posicionadas em cada um dos quatro cantos do PhCRR central, com o intuito de melhorar a eficiência do acoplamento.

Figura 23. Esquema de simulação para a estrutura totalmente óptica com funcionalidade NAND. Observa-se as entradas de sinais A e B , além da saída D .



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

As hastes dielétricas localizadas no centro do PhCRR são chamadas de hastes internas. Como ilustrado na Figura 23, o PhCRR é projetado deslocando-se as hastes internas adjacentes, e denotadas por i_1 , i_2 , i_3 e i_4 , a partir de sua posição original ao longo das direções x e z por $0,25a$ em relação à rede original.

Como se pode observar na Figura 23, duas hastes dielétricas são adicionadas ao redor das hastes internas do PhCRR central, caracterizando defeitos específicos nos guias de onda horizontais e verticais, respectivamente com raios $r_2 = 0,1a \mu\text{m}$ e $r_1 = 0,05 \mu\text{m}$, contribuindo para a funcionalidade NAND. A inserção de uma haste de silício como é mostrada na Figura 23, com raio r_1 , cria um defeito pontual responsável pela propriedade de confinamento da luz [1], [21]. A Tabela 8 mostra o conjunto completo dos parâmetros utilizados durante o projeto da estrutura.

Tabela 8. Resumo dos parâmetros utilizados durante o *design* da estrutura.

Parâmetros	Materiais/Valores
<i>Background</i>	Ar
Material das hastes	Silício
Índice de refração	3,46
Tamanho do <i>wafers</i>	$12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$
Raio das hastes ' r '	$0,11886 \mu\text{m}$
Raio da haste com raio r_1	$0,05 \mu\text{m}$
Raio da haste com raio r_2	$0,05943 \mu\text{m}$
Constante de rede ' a '	$0,5943 \mu\text{m}$

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

A estrutura consiste nas duas portas de entrada A e B , na porta de referência C , e na porta de saída D , conforme mostrado na Figura 23. A estrutura óptica NAND é excitada na porta de referência C , com controle pelas portas de entrada A e B , e o sinal pode ser verificado na porta de saída D . Os feixes ópticos, embora confinados nos guias de onda, obstruem-se mutuamente, e a transmissão desses feixes ópticos depende do tipo de interferência que pode ocorrer.

De acordo com a teoria da óptica ondulatória, a interferência construtiva ocorre quando dois feixes ópticos diferem por uma diferença de fase de $2k\pi$ ($k = 0, 1, 2, \dots$), enquanto que a interferência destrutiva ocorre quando os dois feixes ópticos têm uma diferença de fase de $(2k + 1)\pi$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) [21], [23], [29].

Para todas as combinações binárias das portas de entrada, o feixe de referência na porta C é sempre aplicado com uma fase de 0° . Assim, a título de ilustração, quando um feixe óptico é aplicado na porta de entrada A , a sua fase deve ser 0° para que possa ocorrer interferência construtiva entre o feixe óptico de entrada e o feixe de referência, para fornecer um sinal de potência mínima na porta de saída D .

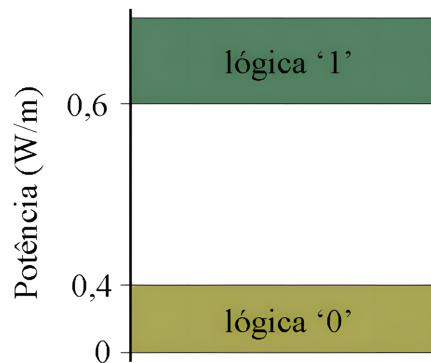
Especificamente, há sempre um sinal de referência ligado na parte superior, na porta C do guia de ondas vertical, para garantir a funcionalidade NAND. Assim, quando nenhum sinal óptico é aplicado às portas A e B , o sinal da porta de referência C é o único que chega à porta de saída D .

Existem dois tipos de estados lógicos: alta potência óptica (estado ON) e baixa potência óptica (estado OFF). De fato, no estado ON, temos a lógica ‘1’ (ou bit 1 ou 1), enquanto que no estado OFF temos a lógica ‘0’ (ou bit 0 ou 0).

Existem dois limiares para identificar os estados lógicos, conforme pode ser observado pela Figura 24. Um limite inferior significa que a potência abaixo deste nível atua como um nível lógico baixo ou de lógica ‘0’. Da mesma forma, os valores de potência acima do limite superior atuam como um nível lógico alto ou de lógica ‘1’. Nenhum estado é definido entre os limites superior e inferior.

De acordo com a Figura 24, a potência óptica detectada na porta de saída D é considerada como sendo de lógica ‘1’ se a potência for maior ou igual a 0,6, e é considerada de lógica ‘0’ se a potência obtida for menor ou igual a 0,4. Portanto, a potência máxima deve ser transmitida no estado lógico ‘1’ em oposição ao estado lógico ‘0’.

Figura 24. Definição dos níveis lógicos ‘0’ e ‘1’ com os correspondentes valores de potência na saída.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

O mecanismo de confinamento de luz das hastes de silício de cristal fotônico fornece a propriedade de comutação entre a lógica ‘1’ e a lógica ‘0’ para a porta lógica óptica.

De fato, as simulações numéricas para a propagação de ondas eletromagnéticas em estruturas baseadas em cristais fotônicos bidimensionais são caracterizadas utilizando-se das equações diferenciais de Maxwell [133, 136, 137]. O método PWE [44, 45, 128, 138] é utilizado para se calcular a banda PBG e os modos de propagação da estrutura de cristais fotônicos, enquanto que o método FDTD é utilizado para calcular o espectro de transmissão de potência (em W/m) e a distribuição de campo que se baseia em soluções numéricas das equações de Maxwell.

5.2 Análise da *Performance*

Para analisar o desempenho obtido para a porta lógica NAND, os parâmetros tais como a razão de contraste (CR), perda de inserção (IL), fator de qualidade (Q -factor), o tempo de resposta (RT) e taxa de *bits* (BR) são utilizados, e medidos a partir dos resultados de saída.

Para analisar o desempenho da estrutura implementada (Figuras 22 e 23) e apresentada neste capítulo, foi calculada a relação entre os dois níveis de potência, isto é, alta potência de transmissão e baixa potência de transmissão. Esta relação ou fator de transmissão é conhecida como razão de contraste, sendo o parâmetro mais importante para se estudar o desempenho das estruturas AOLGs [21], [139]. A razão de contraste [21], [140, 141, 142] é definida como sendo a razão entre a potência média obtida no estado ON (P_{ON}) e a potência média no estado OFF (P_{OFF}), e é dada (em dB) por

$$CR = 10 \log \left(\frac{P_{ON}}{P_{OFF}} \right) \quad (5.1)$$

em que P_{ON} é o nível de potência para a lógica ‘1’ (ou bit 1) e P_{OFF} é o nível de potência para a lógica ‘0’ (ou bit 0). A propriedade de comutação entre a lógica ‘1’ e a lógica ‘0’ da porta lógica totalmente óptica é alcançada pela propriedade de confinamento da luz das hastes de silício de rede quadrada. O raio das hastes dielétricas é otimizado por meio do cálculo da razão de contraste para os diferentes comprimentos de onda (*band gap*), a fim de se obter a potência máxima na porta de saída da estrutura.

Além do mais, o desempenho da estrutura proposta também é analisado por meio do parâmetro perda de inserção, com base nos valores obtidos nos resultados da simulação. A perda de inserção [30, 143, 144] é calculada por

$$IL = 10 \log \left(\frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \right) \quad (5.2)$$

em que P_{OUT} é o nível de potência de saída e P_{IN} é o nível de potência de entrada.

O fator de qualidade (Q) de um dispositivo do tipo ressonador, permite avaliar o quão seletivo é este ressonador para um comprimento de onda específico λ , ou, em outras palavras, permite mensurar o quanto de energia é preservada na estrutura, indicando assim o nível de confinamento de energia no interior da cavidade ressonadora. Em geral, é possível definir Q por meio da seguinte expressão

$$Q = \omega_0 \left(\frac{P_a}{P_d} \right) \quad (5.3)$$

em que o numerador P_a denota a potência total armazenada, o denominador P_d denota a potência dissipada no interior de uma cavidade ressonadora, e ω_0 denota a frequência angular

do modo ressonante. Desta forma, quanto maior o fator de qualidade da estrutura, então menor serão as perdas de energia da cavidade. Considerando os dispositivos abordados neste trabalho, que utilizam cavidades ressoadoras acopladas a dois guias de onda ortogonais entre si, então teremos que a Equação 5.3, em termos dos seus parâmetros de transmissão, pode ser redefinida conforme a Equação 5.4, relação conhecida como fator de qualidade (*Q-factor*) [28], [145], sendo expressa por

$$Q = \frac{\lambda_{ress}}{\Delta\lambda_{FWHM}} \quad (5.4)$$

em que λ_{ress} é o comprimento de onda de ressonância da estrutura, e $\Delta\lambda_{FWHM}$ é definido como sendo a região espectral do centro da ressonância em que a transmissão máxima se reduz pela metade (FWHM – *Full Width at Half Maximum*).

Além do mais, para estudar a eficiência do sistema, também são calculados o tempo de resposta [22] e a velocidade operacional [146], sendo utilizados como medida de desempenho do sistema interativo. A velocidade operacional [21], [146], ou seja, a taxa de *bits* (*BR*), pode ser calculada a partir do tempo de resposta. Trata-se de um fator da velocidade de transferência de dados por meio de circuitos lógicos. A taxa de *bits* (em Tbps) é definida como o recíproco do tempo de resposta observado, ou seja,

$$BR = \frac{1}{RT} \quad (5.5)$$

em que *RT* é o tempo de resposta calculado para a estrutura totalmente óptica.

5.3 Resultados Numéricos

A Figura 25 apresenta o diagrama de bandas da estrutura da porta lógica totalmente óptica proposta. O diagrama de bandas foi calculado utilizando o método de expansão de ondas planas (PWE). A banda PBG da estrutura proposta foi calculada para o modo transversal elétrico (TE), com os modos de propagação na primeira zona de Brillouin (BZ). Conforme é mostrado por meio da Figura 25, a primeira faixa de frequências calculada é $0,320267 \leq a/\lambda \leq 0,3924$, com *gap* de 0,0721332, correspondendo à faixa de comprimentos de onda $1,515 \leq \lambda (\mu\text{m}) \leq 1,856$. A primeira faixa abrange as comunicações ópticas, bandas C, L e U. A constante de rede ‘*a*’ e o raio das hastes $r = 0,2a$, foram devidamente escolhidos para se atingir o PBG em torno do comprimento de onda operacional $\lambda_{ress} = \lambda = 1,7 \mu\text{m}$. Para seleccionar o comprimento de onda operacional para as simulações, considera-se

$$\frac{\omega a}{2\pi c} = \frac{a}{\lambda} \quad (5.6)$$

em que a parte esquerda denota a frequência do *band gap*. De acordo com a Figura 25, o comprimento de onda operacional de 1700 nm está contido no primeiro dos três *band gaps*

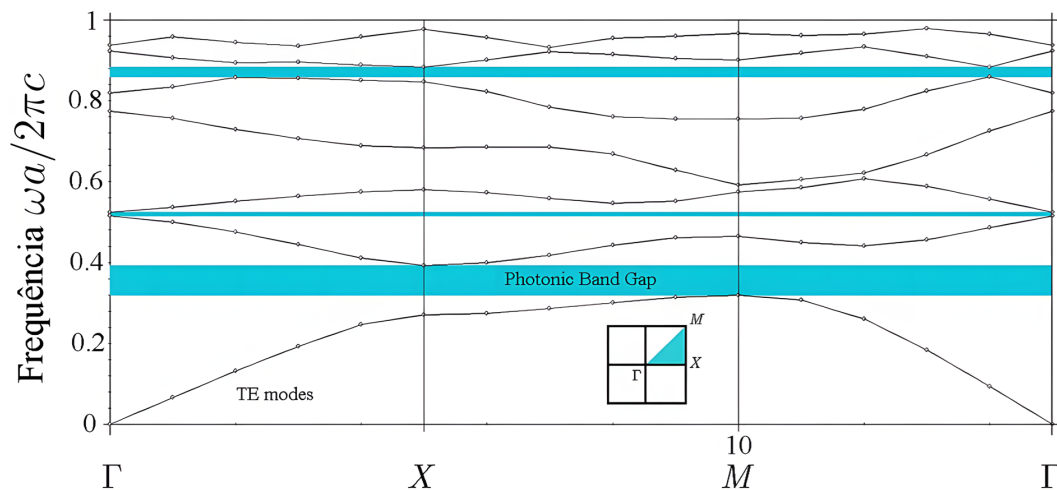
$$\frac{\omega a}{2\pi c} = \begin{cases} 0,320267-0,3924 \\ 0,515897-0,524809. \\ 0,859443-0,883018 \end{cases}$$

Observa-se que a estrutura totalmente óptica proposta pode operar em qualquer comprimento de onda pertencente ao *band gap* fotônico, incluindo o comprimento de onda típico de telecomunicações de 1550 nm.

Nas simulações, uma onda contínua (CW) é utilizada como fonte óptica que opera nas portas da estrutura (*A*, *B* e *C*). A saída da função Booleana NAND é então verificada pela operação de dois *switches* ópticos, uma porta AND seguida por uma porta NOT. A estrutura é excitada nas portas de entrada com uma fonte de luz Gaussiana com frequência de ressonância de $0,34958 a/\lambda$, e comprimento de onda correspondente de $\lambda = 1,7 \mu\text{m}$. A potência de entrada é definida como 1,0 W/m, mais precisamente $\cong 1,014758 \text{ W/m}$.

O desempenho da estrutura é verificado calculando-se a razão de contraste para vários comprimentos de onda. Para escolher o comprimento de onda operacional, varremos a faixa de comprimentos de onda obtida a partir da banda PBG da estrutura, e calculamos a razão de contraste entre a potência de saída de lógica ‘0’ e a potência de saída de lógica ‘1’, conforme mostrado na Figura 26.

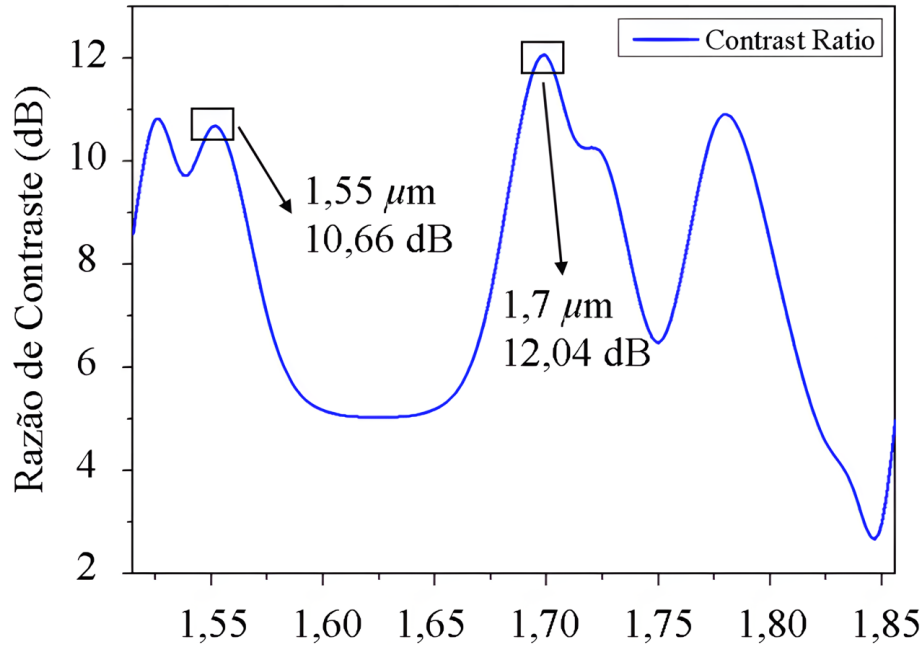
Figura 25. Diagrama de bandas da estrutura totalmente óptica proposta.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Na Figura 26, verifica-se que o valor máximo da razão de contraste é de 12,04 dB no comprimento de onda operacional de $\lambda = 1,7 \mu\text{m}$. Portanto, a frequência de operação utilizada nas simulações numéricas é $\omega a/2\pi c = 0,34958$.

Figura 26. Curva para a razão de contraste da porta lógica NAND proposta.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

A Tabela 9 resume os parâmetros de simulação utilizados para a estrutura. Nas simulações numéricas, os cálculos para a potência óptica utilizam a formulação vetorial de Poynting de ondas eletromagnéticas.

Para a propagação de ondas na direção z [146], tem-se que a potência total no plano xy é obtida como

$$P_z = P_{z-x} + P_{z-y} \quad (5.7)$$

em que o componente polarizado na direção x é dada por

$$P_{z-x} = \text{Re} \left(\frac{1}{2} \iint_S E_x H_y^* dx dy \right) \quad (5.8)$$

e o componente polarizado na direção y é

$$P_{z-y} = -\text{Re} \left(\frac{1}{2} \iint_S E_y H_x^* dx dy \right) \quad (5.9)$$

O vetor Poynting é uma quantidade complexa, em que apenas os níveis de amplitude são utilizados para determinar os estados lógicos. Na Figura 27, observa-se que a resolução da simulação da amplitude do campo elétrico E_y na direção y fornece um certo padrão para o vetor de Poynting, além de uma propagação de sinal de saída equivalente, conforme pode ser observado na porta de saída D da estrutura.

Tabela 9. Resumo dos parâmetros de simulação utilizados para a porta lógica NAND.

Parâmetros	Valores
Comprimento de onda operacional	1,7 μm
Polarização	TE
Campo de entrada transversal	Gaussiano
Número de células da malha x	244
Número de células da malha z	244
Malha Δx (μm)	0,049
Malha Δz (μm)	0,049
Intensidade do sinal para lógica '0'	0,09 W/m
Intensidade do sinal para lógica '1'	1,44 W/m

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Finalmente, para se analisar o espectro de transmissão e a resposta de potência de um sistema físico específico, o método FDTD permite calcular grandezas no domínio da frequência a partir de uma simulação realizada no domínio do tempo. De fato, a ideia central utilizada é a de capturar os campos resultantes no domínio do tempo e utilizar a transformada discreta de Fourier (DFT – *Discrete Fourier Transform*) para produzi-los no domínio da frequência. Com base na potência de saída obtida na porta D , diversos parâmetros foram utilizados para analisar o desempenho da estrutura proposta, e disponibilizados na Tabela 11.

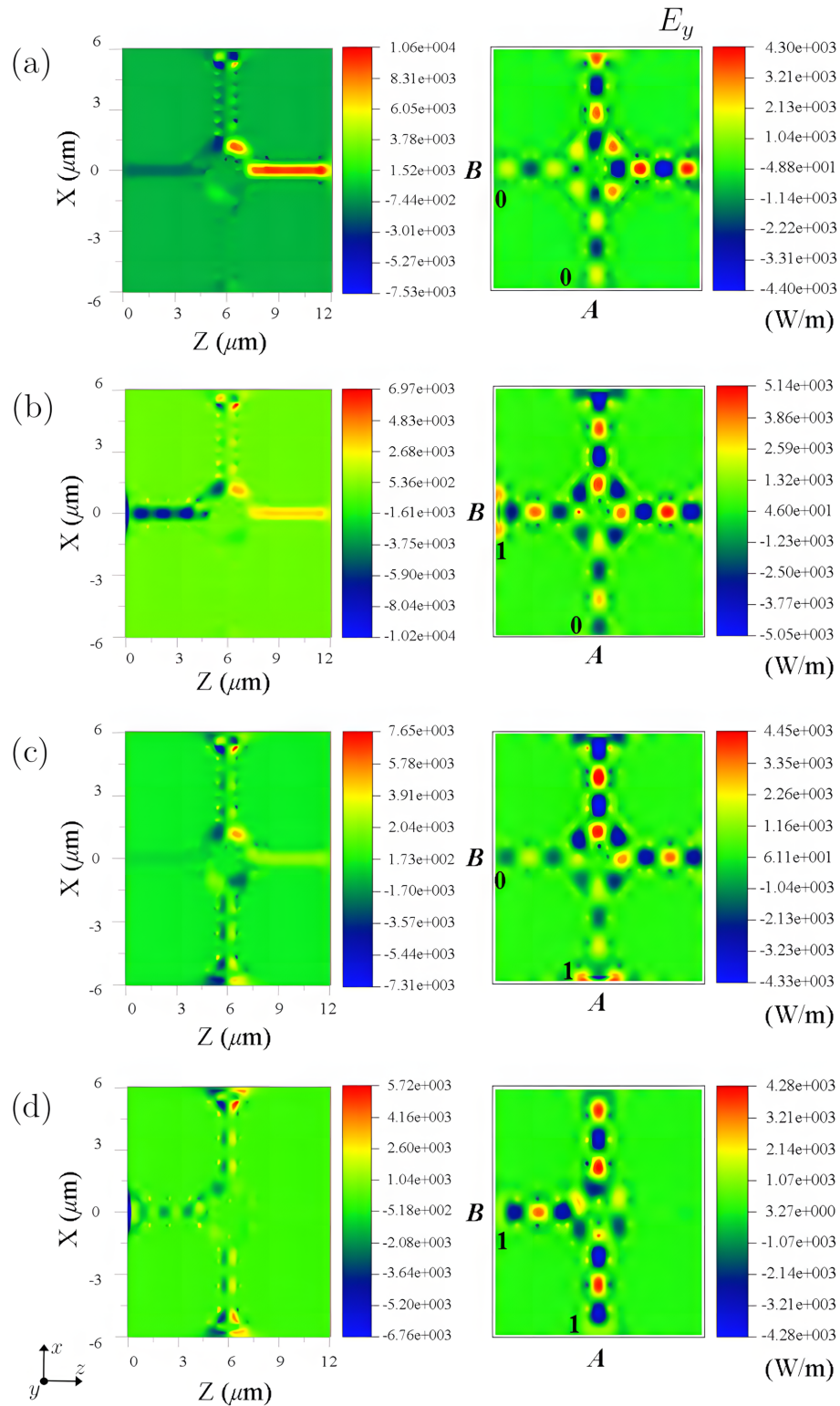
Analisando o sistema proposto de acordo com os resultados obtidos por meio de simulações numéricas bidimensionais, observou-se que a haste com raio r_1 distribui o feixe a partir da entrada A para os outros guias de onda através do PhCRR central, melhorando assim o confinamento da luz no PhCRR e nos guias de onda, além de aumentar a capacidade de comutação da estrutura. Por sua vez, a haste com raio r_2 controla a intensidade da luz que passa para o guia de ondas vertical, e está relacionado à diminuição da potência óptica no guia de ondas da saída D , implicando em uma saída de sinal considerada de lógica '0', conforme é mostrado na Figura 27 (d). Na implementação da função lógica NAND, as fases dos feixes de luz de referência e das entradas representadas pelas portas A e B , são mostradas na Tabela 10.

Tabela 10. Combinações possíveis para as entradas e seus valores de fase.

Entradas		Fase		Saída
A	B	ϕ_A	ϕ_B	
0	0	–	–	1
0	1	–	0°	1
1	0	0°	–	1
1	1	180°	0°	0

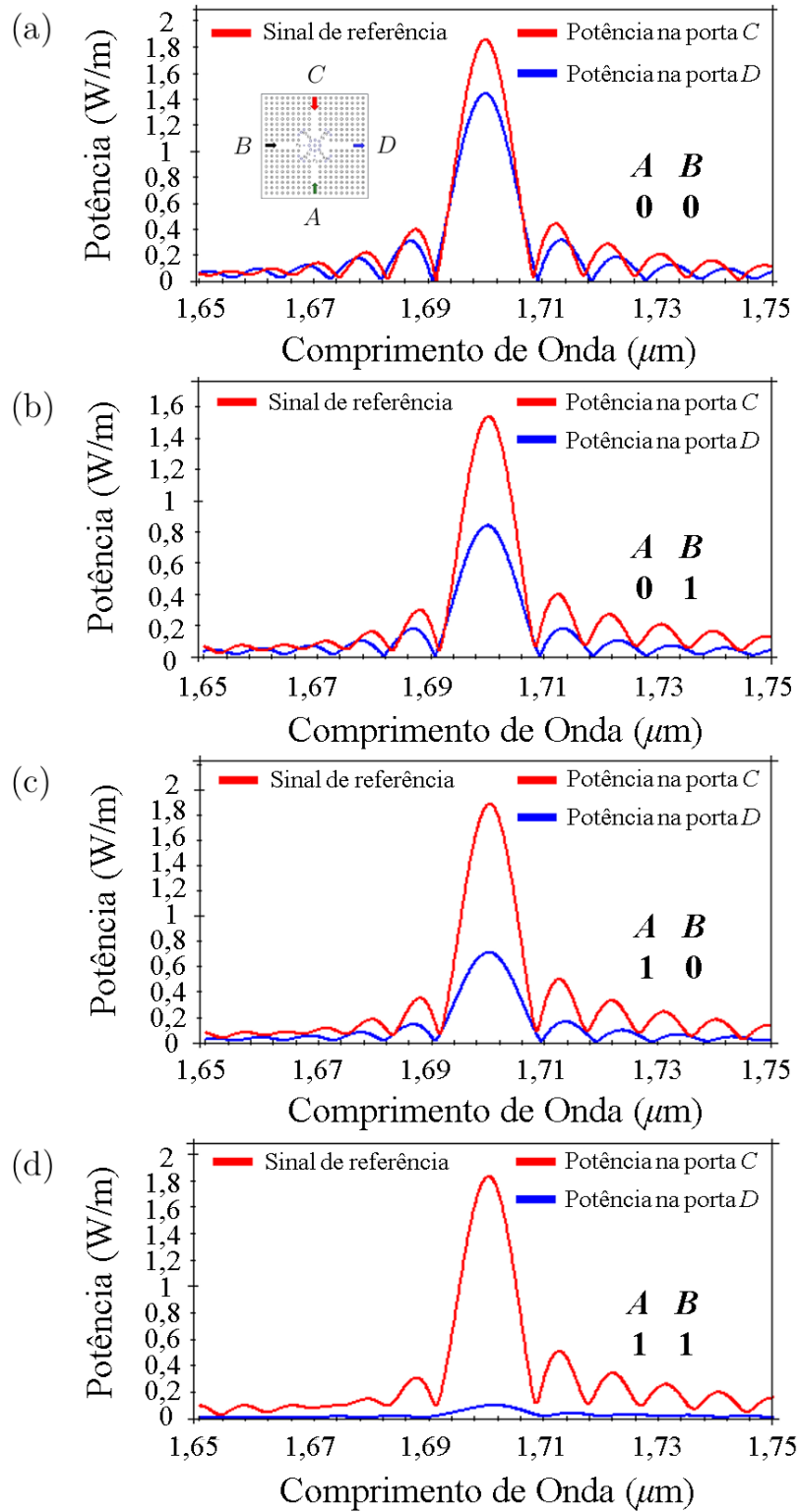
Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Figura 27. Padrão vetorial de Poynting da funcionalidade NAND no comprimento de onda operacional de 1700 nm e a simulação da distribuição do campo elétrico E_y na estrutura 2D, baseada em cristais fotônicos, para os casos (a) 0 – 0; (b) 0 – 1; (c) 1 – 0 e (d) 1 – 1.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Figura 28. Curvas para o nível de potência transmitido na porta de saída D , quando na porta C é aplicada a fonte óptica de bombeamento para as diferentes combinações de entrada, isto é, para os casos (a) $0 - 0$; (b) $0 - 1$; (c) $1 - 0$ e (d) $1 - 1$.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

As Figuras 27 e 28 mostram: caso (a), quando a porta A e a porta B estão no estado OFF (*bit* 0), e na porta de referência C é aplicada a fonte óptica de bombeamento com fase de 0° , então devido as hastes com raio r_1 e r_2 , o sinal óptico da porta de referência C se propagará em direção à porta de saída D (*bit* 1). Portanto, os resultados da propagação do campo elétrico E_y demonstram a capacidade de comutação da estrutura. Neste caso, a fonte óptica situada na porta de referência C é responsável por obter ou garantir a funcionalidade desejada da porta lógica.

No caso (b), há uma saída de sinal óptico na porta D (*bit* 1) devido ao funcionamento do único PhCRR central, enquanto que na porta de referência C , a fonte óptica de bombeamento é aplicada com fase de 0° . Neste caso, nenhum sinal óptico de entrada é aplicado na porta A (*bit* 0), enquanto que um sinal óptico é aplicado na porta B (*bit* 1) com fase de 0° . Sendo assim, ocorre interferência construtiva e o pulso de luz se propagará em direção à porta D da estrutura.

No caso (c), também há sinal óptico na porta D (*bit* 1) quando as portas de entrada A e B invertem o *status* de operação. Isto significa que nenhum sinal é aplicado na porta de entrada B (*bit* 0), enquanto que na porta de entrada A é aplicado um sinal óptico com fase de 0° (*bit* 1). A fase do feixe de referência na porta C é 0° . Portanto ocorre interferência construtiva, e devido às hastes com raios r_1 e r_2 , o pulso de luz se propagará em direção à porta D .

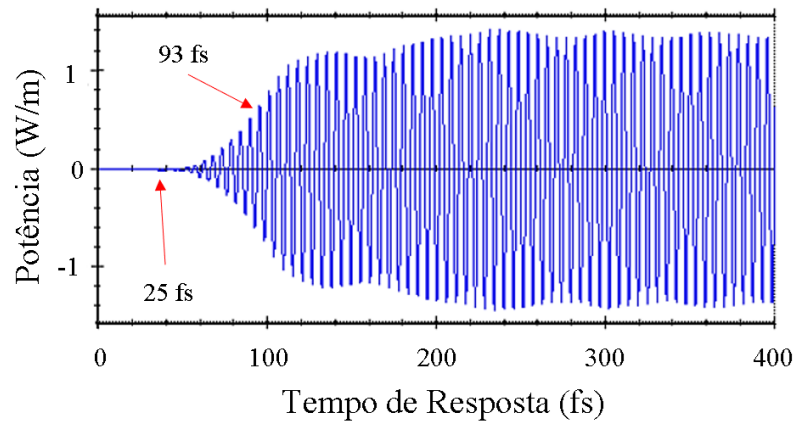
Finalmente, no caso (d), um sinal óptico mínimo se propagará em direção à porta de saída D (*bit* 0). Neste caso, a fonte óptica é aplicada em ambas as portas de entrada A e B com fase de 180° e 0° , respectivamente (*bit* 1). O sinal óptico é aplicado na porta de referência C com fase de 0° . Portanto, neste caso específico, ocorrerão interferências destrutivas e construtivas, respectivamente, e será detectado um nível muito baixo de potência do sinal na porta D , que é considerado como sendo de lógica ‘0’ (*bit* 0).

A análise dos resultados da simulação demonstra que a porta de saída D atinge o estado de lógica ‘1’ a partir de 93 fs para a funcionalidade NAND, conforme evidente na Figura 29.

A razão de contraste máxima calculada para a porta NAND é de 12,04 dB, enquanto que a razão de contraste mínima calculada foi de 8,97 dB. A Tabela 11 mostra que a estrutura proposta apresenta uma alta razão de contraste, melhor do que nos demais trabalhos [21], [22], [140], [146], [147]. O fator de qualidade é de 220,5, indicando um alto desempenho sem o uso de amplificadores ópticos.

De acordo com os resultados das simulações, a máxima perda de inserção calculada para a estrutura operando no comprimento de onda $\lambda = 1,7 \mu\text{m}$, é mínima, sendo cerca de 1,52 dB. A porta lógica NAND apresenta um tempo de resposta e uma taxa de *bits* de 0,025 ps e 40 Tbps, respectivamente.

Figura 29. Curva para o tempo de resposta para a porta lógica NAND.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

A Tabela 11 resume os parâmetros mais importantes para a análise do desempenho da estrutura. Os resultados obtidos do desempenho do dispositivo proposto foram comparados com o desempenho de algumas portas lógicas NAND publicadas nos últimos anos [21, 22, 140, 146–150].

A porta lógica NAND proposta possui um tamanho muito pequeno quando comparada com outras estruturas [22], [140], [146–149], contribuindo para o aumento na densidade de integração de componentes miniaturizados de alto desempenho em circuitos integrados. Além do mais, a Tabela 11 mostra que a estrutura proposta possui uma velocidade operacional maior, quando comparada com outros trabalhos [21], [22], [146], [148], [150]. Em geral, a Tabela 11 mostra que a estrutura proposta apresenta vantagens significativas em parâmetros tais como: tamanho, potência de saída, razão de contraste, fator de qualidade, tempo de resposta, taxa de *bits* e consumo de energia.

Tabela 11. Resumo dos parâmetros de desempenho e comparação com algumas portas lógicas NAND baseadas em cristais fotônicos 2D.

Ref.	Tamanho ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	Output (W/m)	Maximum CR (dB)	Insertion Loss (dB)	Q-factor	Response Time (ps)	Bit Rate (Tbps)
[21] (2023)	114 μm^2	NR	10,31	NR	NR	NR	5
[22] (2020)	424,7 μm^2	1,2	5,79	NR	NR	0,25	4
[140] (2019)	12,5 \times 12	NR	8,47	NR	NR	NR	NR
[146] (2020)	22,1 \times 9,1	0,22	5,29	NR	NR	0,56	1,79
[147] (2020)	471,32 μm^2	NR	13,97	NR	NR	NR	NR
[148] (2021)	988 μm^2	NR	NR	NR	NR	2,5	NR
[149] (2021)	192 μm^2	0,55	NR	NR	NR	NR	NR
[150] (2023)	9 \times 9	0,89	11,71	0,01	NR	0,0278	35,9
Neste Trabalho	10,9 \times 10,9	1,44	12,04	1,52	220,5	0,025	40

Abreviação: NR – Não Reportado.

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

5.4 Conclusão

A estrutura proposta pode operar como porta NAND, que apresenta um tempo de resposta de cerca de 25 fs. Os resultados das simulações eletromagnéticas utilizando o método 2D FDTD evidenciam que a comutação totalmente óptica proposta é uma forte candidata para aplicações em circuitos digitais ópticos ultrarrápidos. Além do mais, os resultados mostram que o PhCRR desempenha um papel essencial na capacidade de comutação da porta lógica NAND.

Em comparação com as AOLGs convencionais, a estrutura proposta tem tamanho muito pequeno de cerca de $10,9 \mu\text{m} \times 10,9 \mu\text{m}$, e pode funcionar com baixo consumo de energia, sem utilizar amplificadores ópticos e materiais não lineares. Agora, devido ao pequeno tamanho da estrutura, a porta NAND é adequada para o uso em PICs, em aplicações ultrarrápidas.

Por fim, os parâmetros de desempenho demonstram que a estrutura simulada é promissora, em geral, para aplicações em sistemas de comunicações ópticas, circuitos de integração óptica, operações totalmente ópticas ultrarrápidas em sistemas de processamento digital, computação, entre outras aplicações.

6 ROTEADORES DE COMPRIMENTO DE ONDA DE CRISTAIS FOTÔNICOS

Os circuitos integrados fotônicos representam uma tecnologia diferenciada, na qual todos os seus componentes e dispositivos ópticos estão integrados para formar um único *chip* fotônico. Estes circuitos ultracompactos e miniaturizados, com uma alta confiabilidade e com erros minimizados, além de uma alta velocidade de operação, irão melhorar bastante as comunicações que utilizam as ondas de luz em suas estruturas [151]. Isto eventualmente implica no roteamento de sinais entre diferentes portas nas redes de circuitos integrados, com conectividade completa e o melhor desempenho [124].

Componentes baseados em cristais fotônicos, tais como divisores [127], [32], circuladores [33], [152], filtros ópticos [153], decodificadores [38], os codificadores de baixa potência [154, 113, 155] e roteadores [156, 157, 35] foram projetados e relatados na literatura. Em particular, os roteadores desempenham um papel vital na transmissão de sinais a partir de um transmissor para um receptor, com baixas perdas e alta eficiência, para fornecer sinais de alta qualidade e minimizar o tráfego na transmissão de dados.

Foi relatado em [32], um roteador 3×3 com duas topologias diferentes interligando três portas de entrada e de saída. A compensação entre a complexidade da estrutura e o recurso de comprimento de onda foi considerado no projeto. O roteador foi projetado para operar no comprimento de onda da terceira janela de transmissão com blocos básicos de roteadores 1×2 .

Em [33], os autores propõem um roteador 4×4 baseado na tecnologia SOI, com oito ressoadores de anel ajustados individualmente. O projeto possui uma razão de extinção máxima de 20,79 dB e largura de banda de 38,5 GHz. Em [153], os autores propuseram uma abordagem totalmente óptica para projetar redes de dados em *chips* combinando roteamento baseado em comprimento de onda com a alta largura de banda no *chip*, um menor consumo de energia e robustez.

Em [38] foi relatado um roteador óptico de cinco portas baseado em ressoadores de anel na plataforma SOI com a tecnologia CMOS padrão. Estes ressoadores podem ser sintonizados através do efeito termo-óptico, apresentando taxas de extinção de 21 dB e 16 dB para as portas.

Em [154], os autores propuseram um roteador de comprimento de onda totalmente óptico e passivo do tipo 1×2 , e também analisaram o comportamento de uma configuração do roteador 4×4 , que foi obtida por meio da montagem de oito roteadores 1×2 , sendo capaz de conectar quatro transmissores e quatro receptores, com um *crosstalk* máximo entre as portas de 13,9 dB.

Na referência [113], os autores demonstram o funcionamento de uma estrutura que utiliza dois componentes básicos do tipo 1×2 . Estes roteadores de comprimento de onda são baseados em cavidades formadas por defeitos pontuais. A alta eficiência de roteamento foi alcançada por meio do *design* das hastes dielétricas da estrutura das micro cavidades com raios graduais.

Em [155], os autores demonstraram um tipo de roteador de comprimento de onda do tipo 4×4 , que exibe um *crosstalk* máximo entre as portas de 15,1 dB em 1567 nm, e uma perda de inserção máxima de 1,73 dB em 1520 nm.

Propomos o roteador 2×2 , bloco básico adequado para se projetar roteadores de ordem superior $N \times N$. Roteadores $N \times N$ podem ser implementados em PICs, o que tornará a técnica de roteamento tão simples quanto as características desejadas de propagação do sinal. Com um tamanho altamente compacto, os roteadores propostos podem ser utilizados para comunicações WDM, aplicações de roteamento em PICs e em redes fotônicas em *chips* para redes ópticas.

6.1 *Design*, Materiais e Métodos

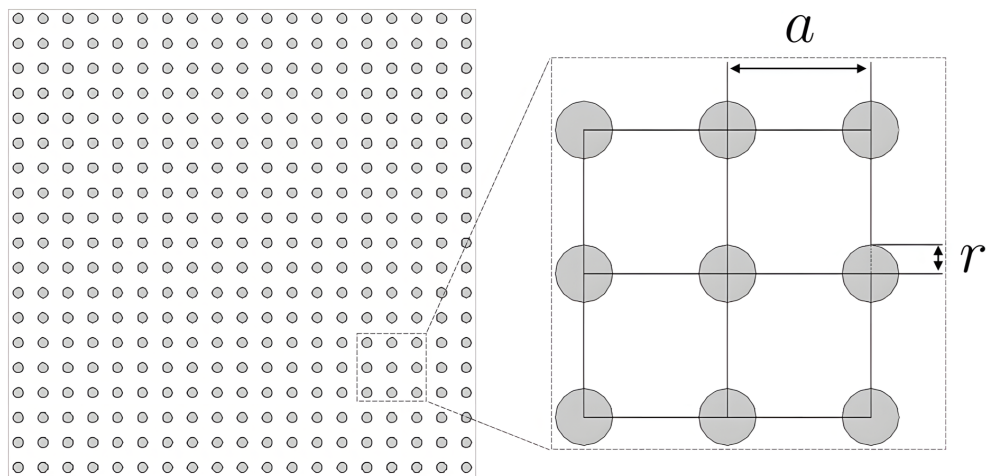
Nesta seção, considera-se a rede quadrada baseada em cristais fotônicos 2D, sendo constituída de hastes de silício em ar, em um *wafer* com dimensões de $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$, conforme ilustrado na Figura 30.

A rede quadrada com as hastes de silício é utilizada para o *design* das estruturas básicas (PhCRR 2×2 λ -router) e da estrutura de composição (PhCRR 4×4 λ -router), sendo composta por quatro estruturas básicas 2×2 , em um *wafer* cujas dimensões é de apenas $23 \mu\text{m} \times 23 \mu\text{m}$. A constante de rede, que é definida pela distância entre duas hastes dielétricas sucessivas, e indicada por ‘*a*’, é igual a $0,5943 \mu\text{m}$, conforme indicado na Figura 30.

Propõe-se estruturas de cristais fotônicos 2D compostas de silício e grafeno, com o intuito de demonstrar o funcionamento típico de roteador de comprimento de onda passivo (λ -router) altamente compacto. A estrutura proposta (PhCRR 2×2 λ -router) utiliza anéis PhCRRs com diâmetros de apenas $6a$, aproximadamente $3,56 \mu\text{m}$ cada, e um cruzamento ortogonal de guias de onda de cristais fotônicos.

As topologias das estruturas propostas possibilitam a montagem em ordem superior, capaz de conectar vários transmissores com os seus múltiplos receptores. Estas estruturas podem ser utilizadas como blocos básicos de construção para o *design* de outras estruturas $N \times N$, por meio de uma abordagem composicional de redes integradas fotônicas mais complexas. Por exemplo, por meio de repetições adequadas das estruturas básicas 2×2 , compõe-se a estrutura 4×4 GWOR, sendo formada por oito PhCRRs.

Figura 30. Rede quadrada com hastes de silício ($\epsilon_r = 12$, $r = 0,2a$, $a = 0,5943 \mu\text{m}$) em ar, sem defeitos, utilizada para o *design* do roteador 2×2 proposto.



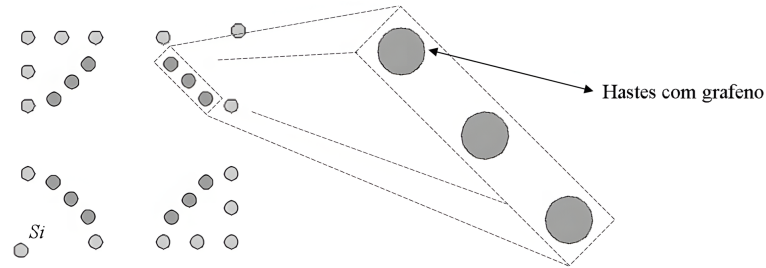
Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

O roteador de comprimento de onda 2×2 , cujo funcionamento é mostrado em detalhes na Figura 32, é o elemento básico de roteamento proposto [ver Figura 33 (a)], para ser utilizado na montagem em matrizes quadradas de dimensão maior, sendo composto por um cruzamento ortogonal de dois guias de onda [ver Figura 33 (b)] e dois PhCRRs [ver Figura 33 (a) e (c)], ambos adequados para a integração em estruturas $N \times N$.

Os anéis ressoadores são obtidos removendo-se uma série de hastes para criar um guia de onda de cristal fotônico aproximadamente circular nas direções x e z . As hastes do entorno dos PhCRRs são acopladas ao cruzamento de guias de onda (horizontal e vertical) adequadamente moldados para se alcançar uma operação de banda larga para a estrutura. Os PhCRRs são localizados nos cantos, e separados dos guias de onda pelas hastes de entorno, porém minimamente próximos para melhorar o acoplamento entre as hastes de silício e os guias de onda, além de aumentar as chances da obtenção de um fator de qualidade consideravelmente alto para as ressonâncias.

Os roteadores propostos apresentam dois anéis ressoadores parcialmente dopados com grafeno. A estrutura é composta por 19×19 hastes de silício para formar a rede fundamental, conforme a Figura 30. Os PhCRRs apresentam 9 hastes internas de silício, cujos raios variam conforme o comprimento de onda de ressonância. As hastes internas dos PhCRRs formam um conjunto de hastes 3×3 , e estão localizadas no centro dos dois PhCRRs, com raios r_1 e r_2 , formando duas cavidades ressonantes específicas. O cruzamento central da estrutura apresenta 12 hastes dopadas com grafeno ($n_g = 2,38 + 1,68i$), sendo localizadas no cruzamento entre os dois guias de onda da estrutura 2×2 . As hastes de grafeno, com raios de $0,2a$, foram projetadas com uma monocamada de grafeno, formando hastes em contraste com as hastes de Si .

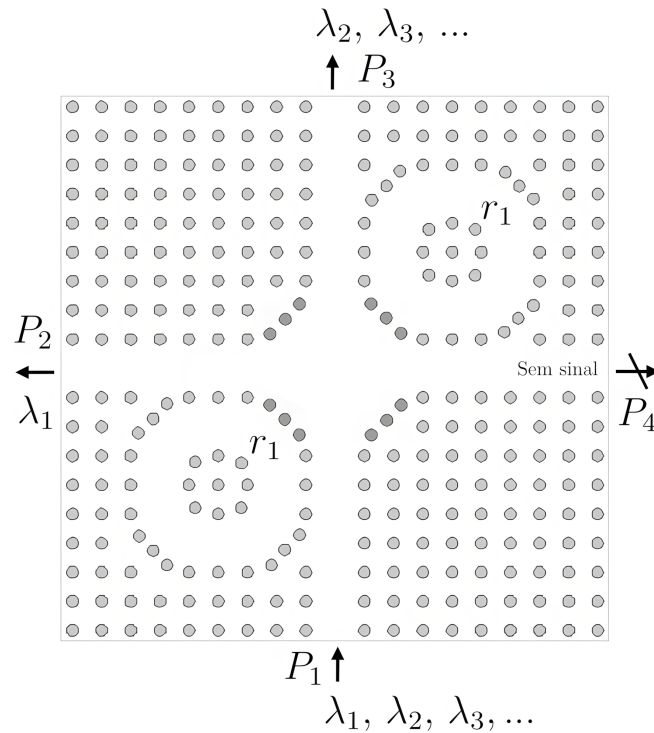
Figura 31. Cristal fotônico com grafeno: vista superior da parte central da estrutura com 12 hastes dielétricas dopadas com grafeno.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

O índice de refração das hastes é $n_{Si} = 3,46$, enquanto que o raio das hastes é $r = 0,2a$, e a constante de rede é $a = 0,5943 \mu\text{m}$, parâmetros construtivos escolhidos adequadamente para se obter um PBG em torno do comprimento de onda operacional $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$.

Figura 32. Esquema de simulação do roteador 2×2 formado por dois PhCRRs. O sinal óptico lançado na porta P_1 é transmitido na porta P_2 (receptor) se o seu comprimento de onda for coincidente com uma das ressonâncias do PhCRR (por exemplo, λ_1), enquanto todos os outros comprimentos de onda (por exemplo, $\lambda_2, \lambda_3, \dots$) são transmitidos na porta P_3 .

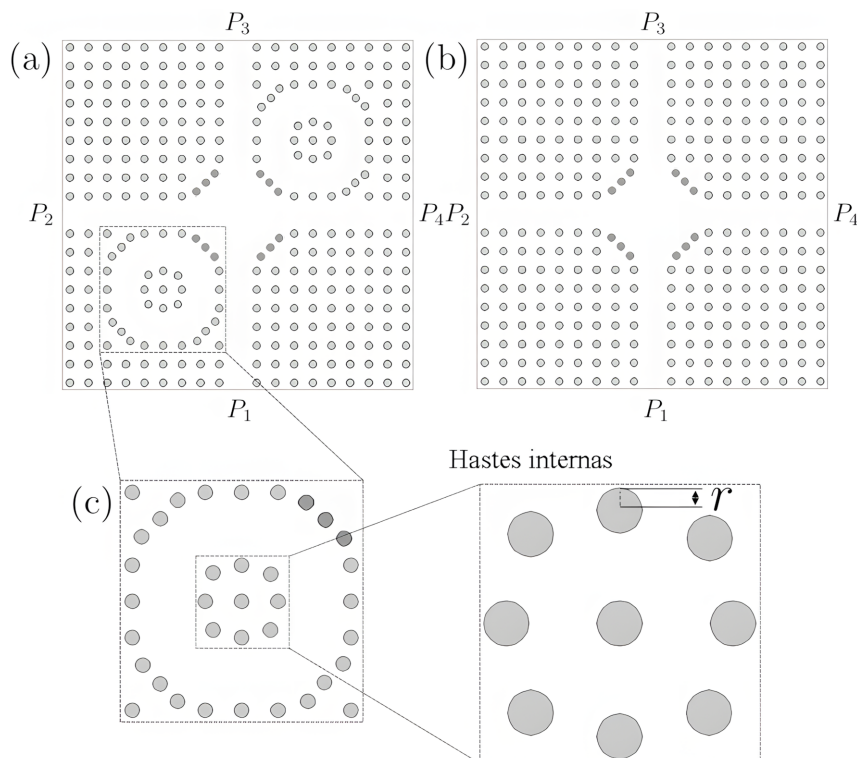


Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

O PhCRR é obtido removendo-se um conjunto de hastes para se criar um guia de onda aproximadamente circular, com o intuito de melhorar o desempenho da estrutura. Os PhCRRs são dopados com grafeno, e são acoplados por um cruzamento de guias de onda de onda, moldados adequadamente para se alcançar uma operação de banda larga. Os resultados numéricos apresentados nas seções seguintes, são obtidos pelo método PWE e pelas simulações bidimensionais do método FDTD. A estrutura é simulada por meio do método FDTD apenas no plano horizontal, em que uma onda contínua se propaga na direção z , enquanto que é considerada infinita no plano vertical, caso em que as possíveis perdas de radiação na direção vertical y são devidamente desprezadas.

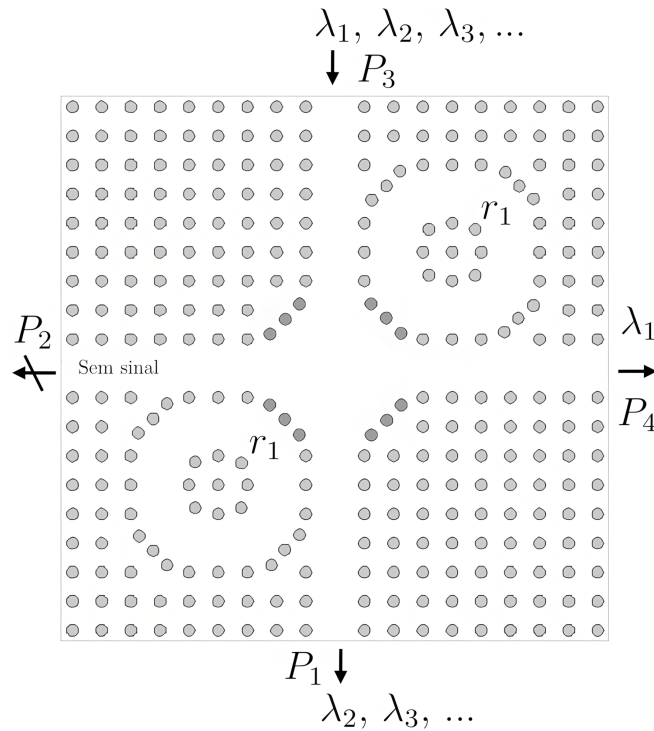
Baseando-se nos comprimentos de onda de entrada, o roteador controla/conduz a luz em direção à porta de saída, que no caso descrito na Figura 32, é a porta P_2 . O *design* do roteador 2×2 , conforme ilustrado na Figura 33 (a), e de suas partes constituintes, ou seja, o cruzamento de guias de onda e o PhCRR, respectivamente, Figuras 33 (b) e (c), é baseado em uma rede quadrada de cristais fotônicos, composta de hastes de silício em contraste com o ar, juntamente com as hastes com grafeno incorporadas na estrutura.

Figura 33. (a) Estrutura básica ou bloco construtivo composicional, roteador 2×2 composto por dois PhCRRs e suas partes constituintes: (b) os dois guias de onda ortogonais de cristais fotônicos obtidos por meio da criação de sucessivos defeitos pontuais, com cruzamento na parte central da estrutura; e (c) o PhCRR em detalhes, obtido em uma rede quadrada com hastes internas de silício com raio r .



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Figura 34. Esquema de simulação para o roteador 2×2 com dois PhCRRs. O sinal óptico lançado na porta P_3 é transmitido para a porta P_4 (receptor) se o seu comprimento de onda for coincidente com uma das ressonâncias do PhCRR (por exemplo, λ_1), enquanto todos os outros comprimentos de onda (por exemplo, $\lambda_2, \lambda_3, \dots$) são transmitidos na porta P_1 .



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

De acordo com o esquema mostrado na Figura 32, o sinal óptico lançado na porta P_1 (Sul) é transmitido para a porta P_2 (Oeste), se o seu comprimento de onda for coincidente com uma das ressonâncias do PhCRR (por exemplo, λ_1), enquanto todos os outros comprimentos de onda (por exemplo, $\lambda_2, \lambda_3, \dots$) são transmitidos para a porta P_3 (Norte). Equivalentemente, conforme mostrado na Figura 34, o sinal óptico acionado na porta P_3 (Norte) é transmitido para a porta P_4 (Leste) se o seu comprimento de onda for coincidente com uma das ressonâncias da cavidade PhCRR (por exemplo, λ_1), enquanto todos os outros comprimentos de onda (por exemplo, $\lambda_2, \lambda_3, \dots$) são transmitidos para a porta P_1 (Sul). Portanto, o funcionamento descrito para a estrutura 2×2 deve ser recíproco, no sentido de que os sinais acionados nas portas P_2 e P_4 devem ser transmitidos para as portas P_1 e P_3 , respectivamente, nos comprimentos de onda ressonantes dos PhCRRs de hastes internas r_1 . No comprimento de onda não ressonante dos PhCRRs, o sinal óptico excitado, por exemplo, na porta P_1 , passa direto para a porta P_3 .

O propósito do elemento básico de roteamento 2×2 proposto, é de ser utilizado para se criar matrizes de ordem superior ($N \times N$) capazes de conectar N entradas com N

saídas. Em um roteador de comprimento de onda, o número de comprimentos de onda necessários para o roteamento dos sinais, aumenta de acordo com o número de transmissores e receptores a serem conectados. Assim, os PhCRRs na matriz devem ser adequadamente projetados para ressoarem em diferentes comprimentos de onda da estrutura. Além do mais, o cruzamento dos guias de onda deve ser de banda larga, para possibilitar, por exemplo, a transmissão para a porta P_3 de todos os outros comprimentos de onda não ressonantes, conforme ocorre no exemplo ilustrado na Figura 32. Nas seções seguintes, apresenta-se o estudo do funcionamento do PhCRR em relação aos parâmetros geométricos considerados.

O cruzamento ortogonal dos guias de onda proporciona uma simetria nas estruturas de composição $N \times N$, por sua vez possibilitando que as estruturas básicas de composição do tipo 2×2 disponibilizem nas estruturas compostas, a sua propriedade inerente de rotacionar. Esta propriedade de rotacionar possibilita uma inversão de posições dos PhCRRs na estrutura, mas mantendo-se os efeitos típicos resultantes do acoplamento entre o cruzamento de guias de onda e os PhCRRs, o que por sua vez possibilita uma diversidade de composições possíveis para a construção/montagem de outras estruturas de composição $N \times N$.

6.2 Obtenção dos Modos Ressonantes e Análise da Performance

Nesta seção, vamos nos concentrar na obtenção e na análise da performance dos modos ressonantes das estruturas baseadas em PhCRRs. Vamos focar no mecanismo de acoplamento entre os dois PhCRRs da estrutura e o cruzamento dos guias de onda de PhC, que proporciona o funcionamento típico do roteador de comprimento de onda do tipo 2×2 . A forma utilizada para os PhCRRs, resultante do *design* que utiliza uma rede quadrada de hastes dielétricas, foi otimizada por meio de inúmeras simulações numéricas utilizando-se o método FDTD, de forma a possibilitar um funcionamento de ressonância para os PhCRRs.

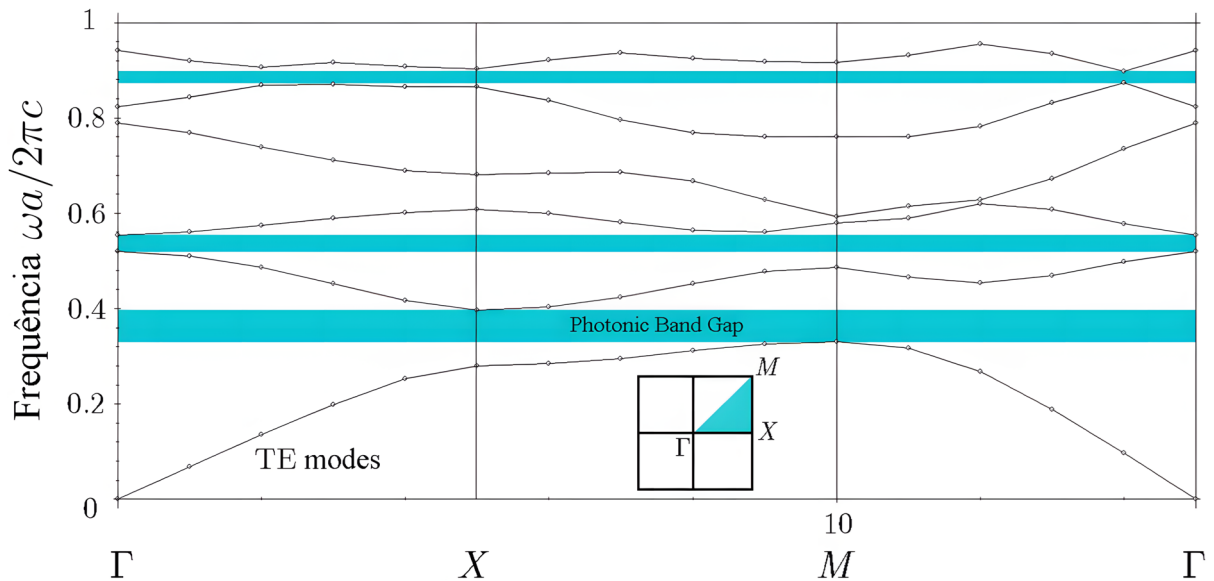
O diagrama de banda calculado para as estruturas básicas de comutação do tipo 2×2 , conforme observado na Figura 35, é calculado pelo método PWE para o modo transversal elétrico (TE), perfazendo um total de 3 TE *band gaps*. O primeiro PBG, dado por $0,330944 \leq a/\lambda \leq 0,396419$, abrange as comunicações ópticas, bandas C, L e U, sendo totalmente funcional nas portas da estrutura, ou seja, qualquer frequência deste range pode ser utilizada para o funcionamento da estrutura.

O TE *band gap* escolhido e utilizado na estrutura 2×2 ($0,330944 \leq a/\lambda \leq 0,396419$), com largura do intervalo de banda de cerca de 0,0655, e frequência central de 0,3637 (a/λ), é correspondente à faixa de comprimentos de onda dada por $1,499 \leq \lambda (\mu\text{m}) \leq 1,796$. De acordo com a Figura 35, a estrutura apresenta os três TE *band gaps*

$$\frac{\omega a}{2\pi c} = \begin{cases} 0,330944-0,396419 \\ 0,52026-0,553554 \\ 0,873857-0,897342 \end{cases}$$

A estrutura pode operar em qualquer comprimento de onda dentro do primeiro TE *band gap*, incluindo o comprimento de onda de 1550 nm.

Figura 35. Diagrama de banda em rede quadrada de hastes de silício em ar para o modo TE.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

A luz na faixa de frequências do PBG não se propaga através da estrutura. Em uma vizinhança da frequência central 0,3637 (a/λ), a frequência escolhida e utilizada nas simulações numéricas é 0,3834 (a/λ), correspondente ao comprimento de onda operacional $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$. Uma vez obtido o comprimento de onda operacional, alguns parâmetros podem ser analisados, entre os quais, a constante de rede ‘ a ’, de forma que os raios das hastes internas dos PhCRRs podem ser otimizados.

A funcionalidade típica do roteador de comprimento de onda proposto é caracterizada e pode ser verificada pelo funcionamento dos seus PhCRRs, que são analisados por meio de simulações numéricas considerando uma onda Gaussiana que é acionada como sinal de entrada na porta P_1 . Uma outra característica interessante, é que o comprimento de onda de ressonância dos PhCRRs podem ser adaptados ou ajustados variando-se os raios das suas hastes internas.

A ressonância dos PhCRRs depende dos parâmetros estruturais, que são otimizados por meio da inserção de hastes internas com raios apropriados para que se obtenha uma elevada eficiência de transmissão.

A medida do raio das hastes internas é escolhida adequadamente de forma que a potência transmitida seja a mais elevada na porta de saída da estrutura. Os raios das hastes internas dos PhCRRs são otimizados por meio do cálculo do fator de qualidade em relação aos diferentes comprimentos de onda (*band gap*), de modo a determinar um *design* adequado. Uma alteração na medida do raio das hastes internas, para incrementos sucessivos, provoca uma alteração da banda de operação da estrutura. Este ajuste do raio das hastes internas dos PhCRRs permite melhorar o desempenho da estrutura, além de ampliar a sua aplicabilidade.

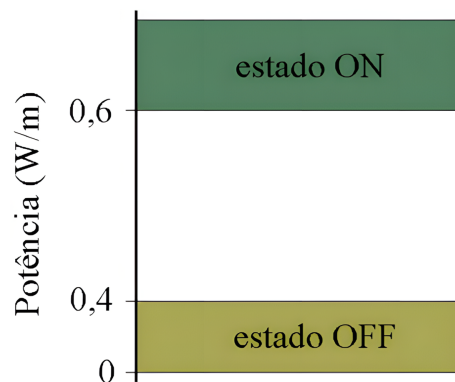
O fator de qualidade de um dispositivo do tipo ressoador, permite avaliar o quão seletivo é este ressoador para um comprimento de onda específico, ou em outras palavras, permite mensurar o quanto de energia é preservada na estrutura, indicando o nível de confinamento de energia no seu interior. O fator de qualidade (Q) é definido conforme a expressão (5.4) da seção 5.2.

Com o intuito de se obter uma potência máxima de sinal para as portas receptoras da estrutura (P_2 ou P_4), os raios (r_1 e r_2) das hastes dielétricas internas dos PhCRRs são otimizados por meio do fator de qualidade, conforme mostrado na Figura 37.

Para analisar o desempenho das estruturas ópticas, 2×2 e 4×4 , são utilizadas duas figuras de mérito, o *crosstalk* e a perda de inserção, sendo estas calculadas considerando-se a relação entre os dois níveis de transmissão obtidos nas saídas das estruturas, isto é, a alta potência de transmissão (estado ON) e a baixa potência de transmissão (estado OFF), conforme definido pela Figura 36.

Conforme a Figura 36, a potência óptica detectada nas portas de saída é considerada no estado ON se a potência for maior ou igual a 0,6, e é considerada no estado OFF se a potência obtida for menor ou igual a 0,4. Portanto, a potência máxima deve ser transmitida no estado ON.

Figura 36. Definição dos estados de transmissão com os correspondentes valores de potência na saída das estruturas.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

O desempenho da estrutura 2×2 é analisado por meio de simulações numéricas utilizando-se do método FDTD com camadas perfeitamente casadas (PML), de modo a evitar reflexões indesejadas que poderiam interferir bastante nos resultados das simulações. Em cada simulação que foi implementada, utilizou-se como sinal de entrada uma onda contínua Gaussiana, juntamente com a condição de Courant, uma condição necessária utilizada para a convergência durante a solução numérica das equações diferenciais de Maxwell.

Com relação aos parâmetros utilizados para quantificar o desempenho da estrutura básica 2×2 e do GWOR 4×4 , podemos conceituá-los da seguinte forma: O *crosstalk* é o fenômeno em que um sinal transmitido em um canal de um sistema de transmissão cria um efeito indesejado em um outro canal. Por sua vez, a perda de inserção é a quantidade de luz que é perdida quando o sinal chega à extremidade receptora. Além do mais, a perda de inserção é medida em decibéis (dB) e cada conexão passiva em um sistema aumenta a perda de dB para o sistema como um todo.

A transmitância foi obtida em todas as portas de saída, então o *crosstalk* (Ct) e a perda de inserção (IL), expressas em dB, foram calculadas por meio das expressões

$$Ct_{i,j} = T_j - T_i \quad (6.1)$$

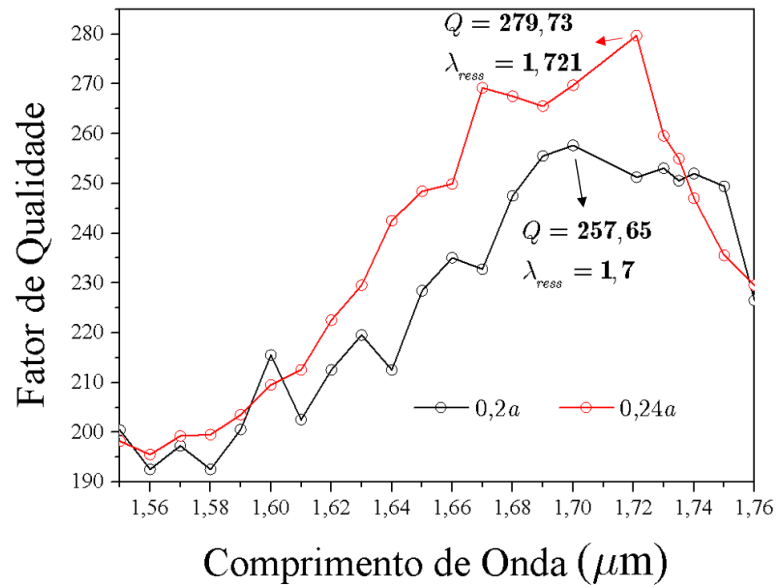
$$IL = -T_i \quad (6.2)$$

em que i e j correspondem a P_2 , P_3 e P_4 , enquanto que T_i e T_j denotam as transmitâncias na porta de passagem e nas portas isoladas, respectivamente, e expressas em dB.

Considerando os raios das hastes internas medindo $0,2a$ e $0,24a$ (μm), a potência transmitida na porta P_2 possui intensidade variando dentro da faixa $0,0309-1,2493$ (W/m). Conforme é mostrado na Figura 37, os dois raios das hastes internas dos PhCRRs exibem um fator de qualidade máximo de cerca de $Q \cong 257,65$ para o comprimento de onda operacional $\lambda_1 = 1,7 \mu\text{m}$, com raio das hastes internas $r_1 = 0,2a$, e um fator de qualidade máximo de $Q \cong 279,73$ no comprimento de onda $\lambda_2 = 1,721 \mu\text{m}$, com raio das hastes internas $r_2 = 0,24a$. A Tabela 12 apresenta um resumo dos comprimentos de onda ressonantes da estrutura 2×2 .

A estrutura 2×2 apresenta um terceiro comprimento de onda operacional, isto é, $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$, em que o raio das hastes internas correspondente para os dois PhCRRs, é o mesmo raio das hastes da estrutura fundamental, com guias de onda formados por hastes dielétricas com raio $r = 0,2a$. O comprimento de onda $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$ é escolhido arbitrariamente a partir do range de frequências.

Figura 37. Fator de qualidade em função do comprimento de onda, conforme a variação da medida do raio das hastes internas dos PhCRRs, para o modo TE.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Tabela 12. Resumo dos comprimentos de onda ressonantes e raios das hastes internas correspondentes para a estrutura 2×2 .

Ressonadores	Raio das hastes (μm)	λ_{ress} (μm)
r_1	$0,2a$	$1,7$
r_2	$0,24a$	$1,721$

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

6.3 Resultados Numéricos

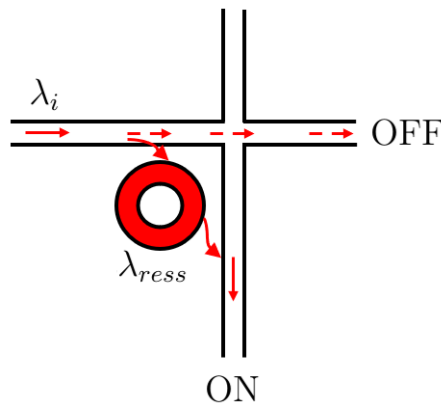
Considerando que os dois PhCRRs na matriz de roteamento são acionados em diferentes comprimentos de onda ressonantes, cada porta de entrada, denotadas como P_1 e P_3 , podem ser conectadas a todas as portas de saída, de acordo com o comprimento de onda do sinal de entrada, definidos por λ_1 , λ_2 e λ_3 . Particularmente, tem-se que os PhCRRs com hastes internas de raios $r_i = r_1$, ressoam no comprimento de onda operacional $\lambda_1 = 1,7 \mu\text{m}$, enquanto que os PhCRRs com as hastes internas de raios $r_i = r_2$, ressoam em $\lambda_2 = 1,721 \mu\text{m}$. Agora, escolhendo-se um terceiro comprimento de onda, que no caso é $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$, para o qual nenhum dos PhCRRs satisfazem a condição de ressonância, então os *links* possíveis entre as portas de entrada e saída estão ilustrados conforme a Tabela 13. Nesta topologia utilizada, os *links* correspondentes à mesma porta de entrada e saída não são permitidos, e são indicados pelo símbolo $-$.

A operação básica de um PhCRR é mostrada na Figura 38. O sinal óptico de entrada será acoplado através da outra porta (estado ON) se o comprimento de onda de entrada λ_i for o mesmo que um dos comprimentos de onda de ressonância do PhCRR, por exemplo, λ_{ress} , ou seja, λ_i satisfaz a seguinte condição de ressonância

$$m\lambda_{ress} = n_{eff}l \quad (6.3)$$

que expressa a dependência do comprimento de onda ressonante na geometria do ressoador, em que m é um inteiro, λ_{ress} é um comprimento de onda ressonante, n_{eff} é o índice efetivo do modo óptico e l é o comprimento do ressoador.

Figura 38. Operação básica de um PhCRR de acordo com a condição de ressonância.

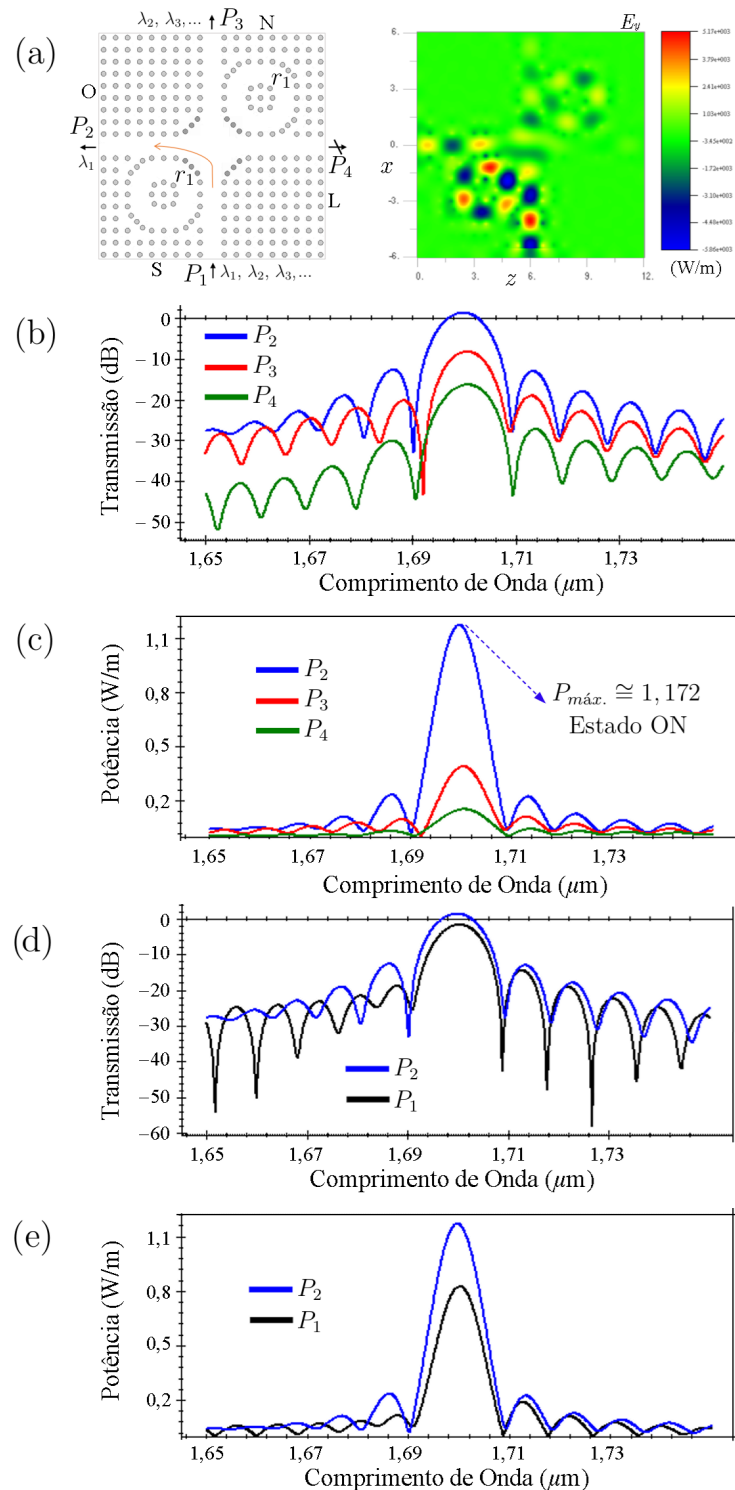


Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

6.3.1 Resultados Numéricos e Análise da Estrutura 2×2

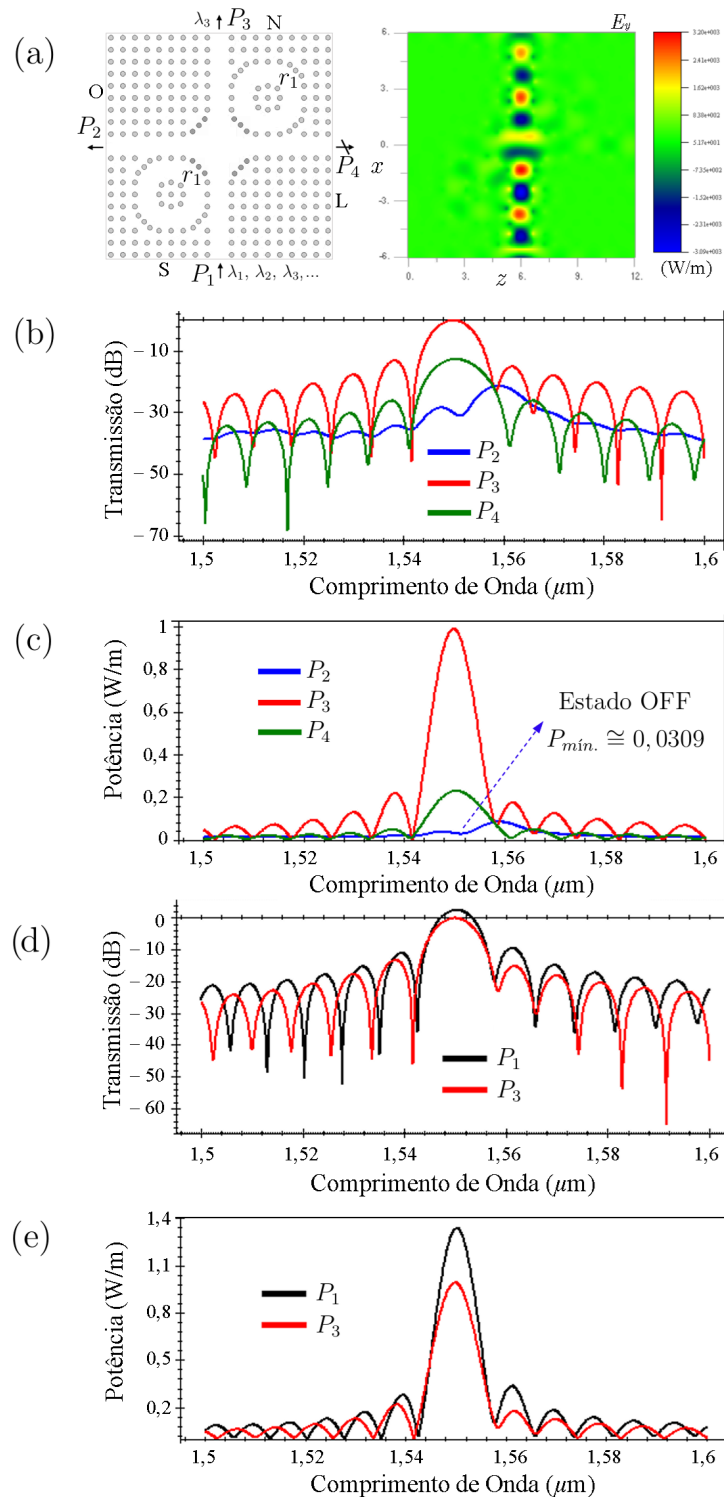
A simulação e a análise da estrutura baseada em dois PhCRRs, é realizada de acordo com o comprimento de onda utilizado como sinal de entrada (λ_1 , λ_2 ou λ_3). A Figura 39 mostra os espectros de transmitância nas diferentes portas da estrutura (P_2 , P_3 e P_4) quando o sinal óptico é acionado na porta de entrada P_1 no comprimento de onda operacional $\lambda_1 = 1,7 \mu\text{m}$. A transmitância obtida na porta P_2 é de cerca de $T_2 \cong 1,371$ dB; a transmitância na porta P_3 é $T_3 \cong -8,236$ dB e para a porta P_4 é $T_4 \cong -16,359$ dB. Apresentando uma largura de banda de 0,0655, o cruzamento dos guias de onda apresenta os seguintes valores calculados para o *crossstalk* entre a porta de passagem (P_2) e as portas isoladas (P_3 e P_4), $Ct_{2,3} = -9,607$ dB e $Ct_{2,4} = -17,73$ dB, caracterizando assim a qualidade da simetria da estrutura. A perda de inserção máxima calculada é de $IL \cong -1,371$ dB no comprimento de onda $\lambda_1 = 1,7 \mu\text{m}$. Um resumo dos resultados obtidos para os casos representados pelas Figuras 39–42 é apresentado na Tabela 14. A potência máxima transmitida ocorre na porta P_2 , cerca de $P_{m\acute{a}x.} \cong 1,1709$ W/m, enquanto que a potência mínima ocorre na porta P_4 , cerca de $P_{m\acute{i}n.} \cong 0,1422$ W/m.

Figura 39. Espectros de transmitância e curvas dos níveis de potência transmitida nas portas P_2 , P_3 e P_4 (O, N e L) quando o sinal óptico é acionado na porta P_1 (S) no comprimento de onda $\lambda_1 = 1,7 \mu\text{m}$: (a) estrutura 2×2 e simulação da distribuição do campo elétrico E_y ; (b) espectros de transmissão para o roteador 2×2 quando $r_1 = r = 0,2a$; (c) nível de potência óptica transmitida nas portas quando o sinal na porta P_1 está no estado ON; (d) espectros de transmissão nas portas P_1 e P_2 ; (e) nível de potência óptica transmitida nas portas P_1 e P_2 .



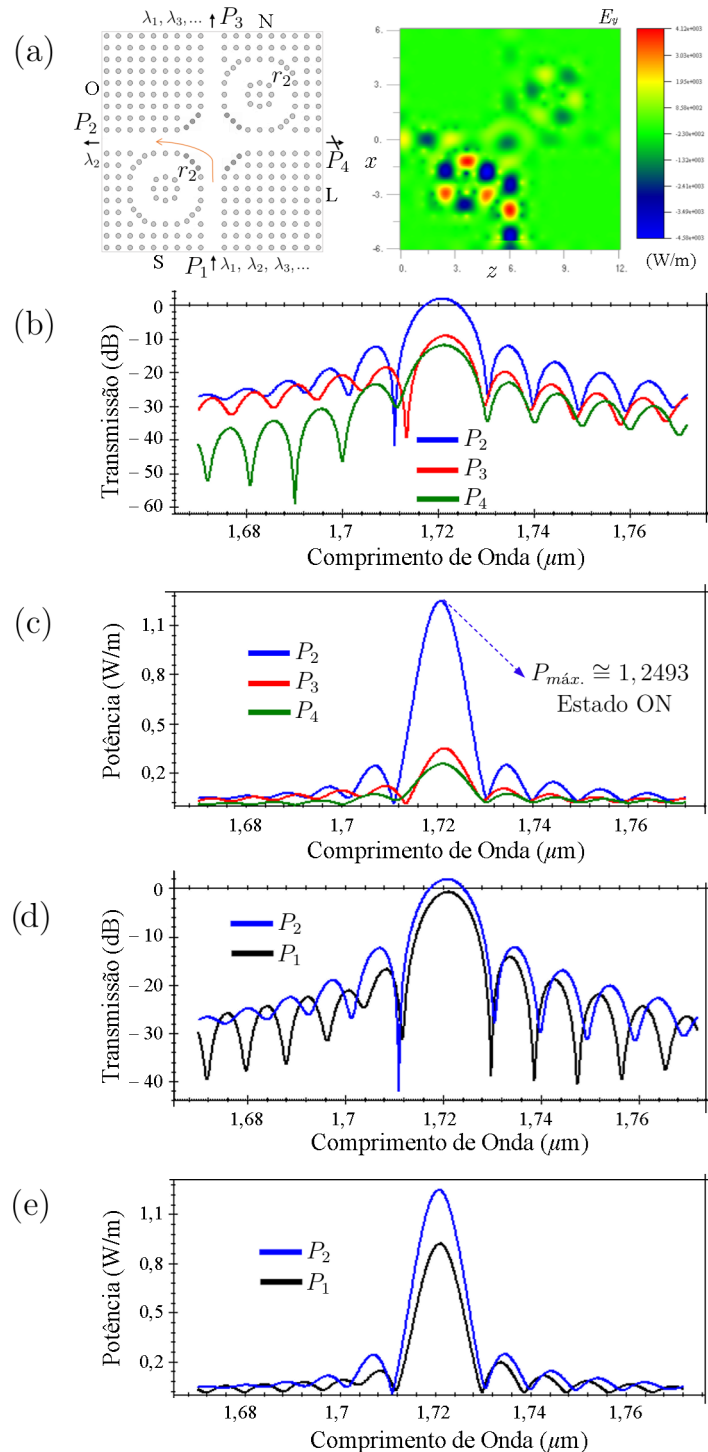
Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Figura 40. Espectros de transmitância e curvas dos níveis de potência transmitida nas portas P_2 , P_3 e P_4 (O, N e L) quando o sinal óptico é acionado na porta P_1 (S) no comprimento de onda $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$: (a) estrutura 2×2 e simulação da distribuição do campo elétrico E_y ; (b) espectros de transmissão para o roteador 2×2 quando $r_1 = r = 0,2a$ (c) nível de potência óptica transmitida nas portas quando o sinal na porta P_1 está no estado OFF; (d) espectros de transmissão nas portas P_1 e P_3 ; (e) nível de potência óptica transmitida nas portas P_1 e P_3 .



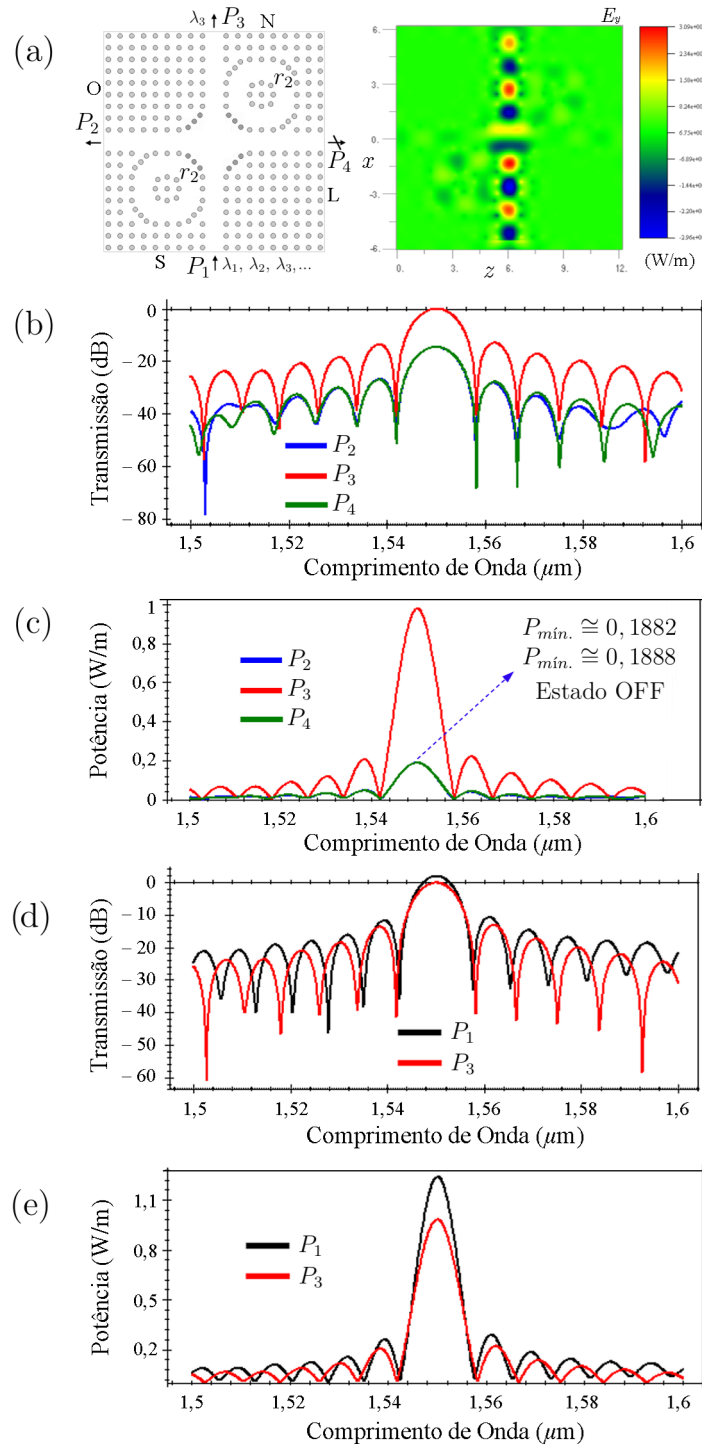
Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Figura 41. Espectros de transmitância e curvas dos níveis de potência transmitida nas portas P_2 , P_3 e P_4 (O, N e L) quando o sinal óptico é acionado na porta P_1 (S) no comprimento de onda $\lambda_2 = 1,721 \mu\text{m}$: (a) estrutura 2×2 e simulação da distribuição do campo elétrico E_y ; (b) espectros de transmissão de sinal do roteador 2×2 quando $r_2 = 0,24a$ (c) nível de potência óptica transmitida nas portas quando o sinal na porta P_1 está no estado ON; (d) espectros de transmissão nas portas P_1 e P_2 ; (e) nível de potência óptica transmitida nas portas P_1 e P_2 .



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Figura 42. Espectros de transmitância e curvas dos níveis de potência transmitida nas portas P_2 , P_3 e P_4 (O, N e L) quando o sinal óptico é acionado na porta P_1 (S) no comprimento de onda $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$: (a) estrutura 2×2 e simulação da distribuição do campo elétrico E_y ; (b) espectros de transmissão de sinal do roteador 2×2 quando $r_2 = 0,24a$ (c) nível de potência óptica transmitida nas portas quando o sinal na porta P_1 está no estado OFF; (d) espectros de transmissão nas portas P_1 e P_3 ; (e) nível de potência óptica transmitida nas portas P_1 e P_3 .



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

A Figura 40 mostra os espectros de transmitância nas diferentes portas (P_2 , P_3 e P_4) quando o sinal é acionado na porta P_1 no comprimento de onda operacional $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$. A transmitância na porta P_2 é de cerca de $T_2 \cong -30,194 \text{ dB}$; a transmitância na porta P_3 é $T_3 \cong -0,069 \text{ dB}$ e para a porta P_4 é $T_4 \cong -12,77 \text{ dB}$. O cruzamento dos dois guias de onda apresenta os seguintes valores calculados para o *crosstalk* entre a porta de passagem (P_3) e as portas isoladas (P_2 e P_4), dados por $Ct_{3,2} = -30,125 \text{ dB}$ e $Ct_{3,4} = -12,701 \text{ dB}$, um *crosstalk* entre as portas em torno do comprimento de onda operacional $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$, caracterizando a qualidade da simetria da estrutura. A perda de inserção máxima calculada é de $IL \cong 0,069 \text{ dB}$ em torno do comprimento de onda operacional $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$. A Figura 40 apresenta os espectros de transmitância e o níveis para as potências transmitidas nas portas P_2 , P_3 e P_4 . A simulação para a propagação do campo elétrico E_y entre as portas P_2 , P_3 e P_4 , é mostrada na Figura 40 (a). A potência máxima transmitida ocorre na porta de passagem P_3 , sendo cerca de $P_{máx.} \cong 0,995 \text{ W/m}$, enquanto que a potência mínima verificada ocorre na porta P_2 , cerca de $P_{mín.} \cong 0,0309 \text{ W/m}$, devido as interferências e as perdas por dispersão.

A Figura 41 mostra os espectros de transmitância nas diferentes portas (P_2 , P_3 e P_4) quando o sinal é acionado na porta P_1 no comprimento de onda operacional $\lambda_2 = 1,721 \mu\text{m}$. A transmitância na porta P_2 é $T_2 \cong 1,9333 \text{ dB}$; a transmitância na porta P_3 é $T_3 \cong -9,2079 \text{ dB}$ e para a porta P_4 , é $T_4 \cong -11,9442 \text{ dB}$. O cruzamento dos guias de onda apresenta os seguintes valores calculados para o *crosstalk* entre a porta de passagem (P_2) e as duas portas isoladas (P_3 e P_4), dados por $Ct_{2,3} = -11,1412 \text{ dB}$ e $Ct_{2,4} = -13,8775 \text{ dB}$, um *crosstalk* entre as portas em torno do comprimento de onda operacional de $\lambda_2 = 1,721 \mu\text{m}$, caracterizando a qualidade da simetria da estrutura. A perda de inserção máxima calculada é $IL \cong -1,9333 \text{ dB}$ em torno do comprimento de onda operacional de $\lambda_2 = 1,721 \mu\text{m}$. A Figura 41 apresenta os espectros de transmitância e as curvas dos níveis de potência transmitida nas portas P_2 , P_3 e P_4 . A simulação da propagação do campo elétrico E_y entre as portas P_2 , P_3 e P_4 , é mostrada na Figura 41 (a). A potência máxima transmitida ocorre na porta P_2 e é cerca de $P_{máx.} \cong 1,2493 \text{ W/m}$, enquanto que a potência mínima verificada ocorre na porta P_4 e é cerca de $P_{mín.} \cong 0,2228 \text{ W/m}$, devido as interferências e as perdas por dispersão.

A Figura 42 mostra os espectros de transmitância nas diferentes portas (P_2 , P_3 e P_4) quando o sinal é acionado na porta P_1 no comprimento de onda operacional de $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$. A transmitância na porta P_2 é $T_2 \cong -14,495 \text{ dB}$; a transmitância na porta P_3 é $T_3 \cong -0,161 \text{ dB}$ e para a porta P_4 é $T_4 \cong -14,506 \text{ dB}$. O cruzamento dos dois guias de onda apresenta os seguintes valores calculados para o *crosstalk* entre a porta de passagem (P_3) e as portas isoladas (P_2 e P_4), dados por $Ct_{3,2} = -14,334 \text{ dB}$ e $Ct_{3,4} = -14,345 \text{ dB}$, um *crosstalk* entre as portas em torno do comprimento de onda operacional $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$, caracterizando a qualidade da simetria da estrutura. A perda de inserção máxima calculada é de $IL \cong 0,161 \text{ dB}$ em torno do comprimento de onda operacional de $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$. A

Figura 42 apresenta os espectros de transmitância e as curvas para os níveis de potência transmitida nas portas P_2 , P_3 e P_4 . Também apresenta a simulação da propagação do campo elétrico E_y entre as portas P_2 , P_3 e P_4 , conforme mostra a Figura 42 (a). A potência máxima transmitida ocorre na porta P_3 , sendo cerca de $P_{máx.} \cong 0,985$ W/m, enquanto que a potência mínima é verificada nas portas isoladas P_2 e P_4 , com valores muito próximos, de aproximadamente $P_{mín.} \cong 0,1888$ W/m e $P_{mín.} \cong 0,1882$ W/m, respectivamente, devido as interferências e as perdas por dispersão que podem ocorrer durante as simulações.

A distribuição de campo ao longo do meio é exibida nas Figuras 39–42. No grafeno monocamada, é bem conhecido que a atenuação da luz incidente é de cerca de 2,3 %. Com o intuito de melhorar a eficiência e o desempenho da estrutura 2×2 , a inserção do grafeno no cruzamento de guias de onda conduz a determinados valores de *crosstalk* e de perda de inserção durante o seu funcionamento, conforme apresentado na Tabela 14. Sem dopagem, quando o sinal óptico é acionado na porta de entrada P_1 no comprimento de onda operacional $\lambda_1 = 1,7 \mu\text{m}$, para o caso $r_1 = 0,2a$ conforme representado pela Figura 39, o cruzamento dos guias de onda apresenta os seguintes valores calculados para o *crosstalk* entre a porta de passagem (P_2) e as portas isoladas (P_3 e P_4), isto é, $Ct_{2,3} = -9,532$ dB e $Ct_{2,4} = -17,485$ dB, com uma perda de inserção máxima de $IL \cong -1,258$ dB. Para o caso representado pela Figura 40, ou seja, no comprimento de onda operacional $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$, com $r_1 = 0,2a$, temos os seguintes valores calculados para o *crosstalk* entre a porta de passagem (P_3) e as portas isoladas (P_2 e P_4), dados por $Ct_{3,2} = -30,016$ dB e $Ct_{3,4} = -12,431$ dB, com uma perda de inserção máxima de $IL \cong 0,107$ dB. No caso representado pela Figura 41, ou seja, no comprimento de onda operacional $\lambda_2 = 1,721 \mu\text{m}$, com $r_2 = 0,24a$, temos os seguintes valores calculados para o *crosstalk* entre a porta de passagem (P_2) e as duas portas isoladas (P_3 e P_4), dados por $Ct_{2,3} = -10,826$ dB e $Ct_{2,4} = -13,504$ dB, com uma perda de inserção máxima de $IL \cong -1,875$ dB. Agora, para o caso representado pela Figura 42, ou seja, no comprimento de onda operacional $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$, com $r_2 = 0,24a$, temos os seguintes valores calculados para o *crosstalk* entre a porta de passagem (P_3) e as portas isoladas (P_2 e P_4), dados por $Ct_{3,2} = -14,165$ dB e $Ct_{3,4} = -14,037$ dB, com uma perda de inserção máxima de $IL \cong 0,231$ dB.

Tabela 13. Todos os *links* esperados para a estrutura 2×2 , para o caso $r_i = r_1$.

Sinal de Entrada	Sinal de Saída			
	P_1	P_2	P_3	P_4
P_1	—	λ_1	λ_2, λ_3	—
P_2	λ_1	—	—	λ_2, λ_3
P_3	λ_2, λ_3	—	—	λ_1
P_4	—	λ_2, λ_3	λ_1	—

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Tabela 14. Resumo dos resultados simulados para a estrutura básica 2×2 .

r_1, λ_1 (Figura 39)	λ_3 (Figura 40)	r_2, λ_2 (Figura 41)	λ_3 (Figura 42)
$Ct_{2,3} = -9,607$ dB	$Ct_{3,2} = -30,125$ dB	$Ct_{2,3} = -11,1412$ dB	$Ct_{3,2} = -14,334$ dB
$Ct_{2,4} = -17,73$ dB	$Ct_{3,4} = -12,701$ dB	$Ct_{2,4} = -13,8775$ dB	$Ct_{3,4} = -14,345$ dB
$IL \cong -1,371$ dB	$IL \cong 0,069$ dB	$IL \cong -1,9333$ dB	$IL \cong 0,161$ dB

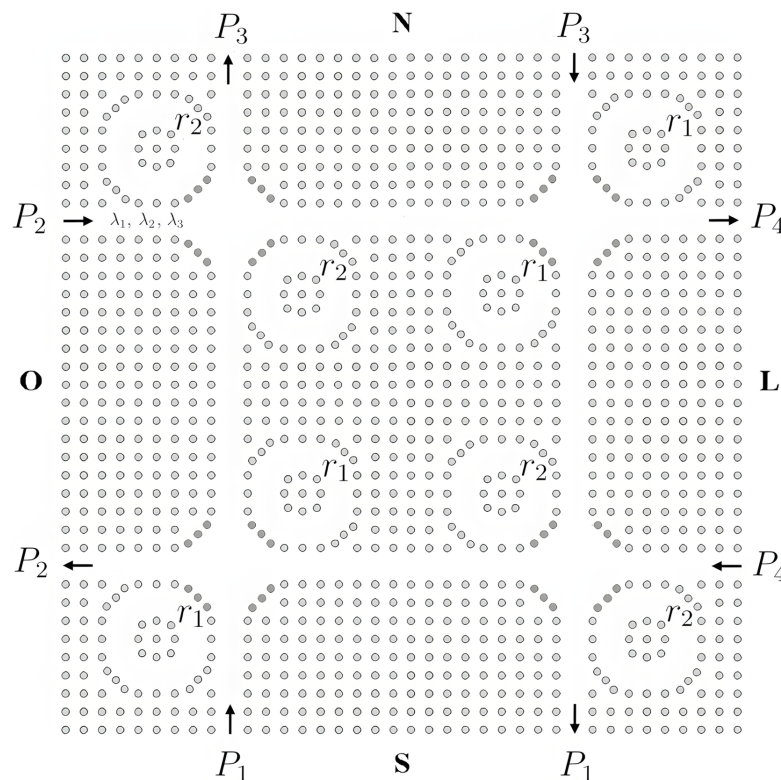
Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Finalmente, analisando a Tabela 13, podemos observar o comportamento recíproco da estrutura 2×2 , caracterizado pelo seu *design* específico considerando a simetria da posição das partes constituintes, os PhCRRs e os guias de onda, em uma rede quadrada de hastes dielétricas.

6.3.2 Resultados Numéricos e Análise da Estrutura 4×4

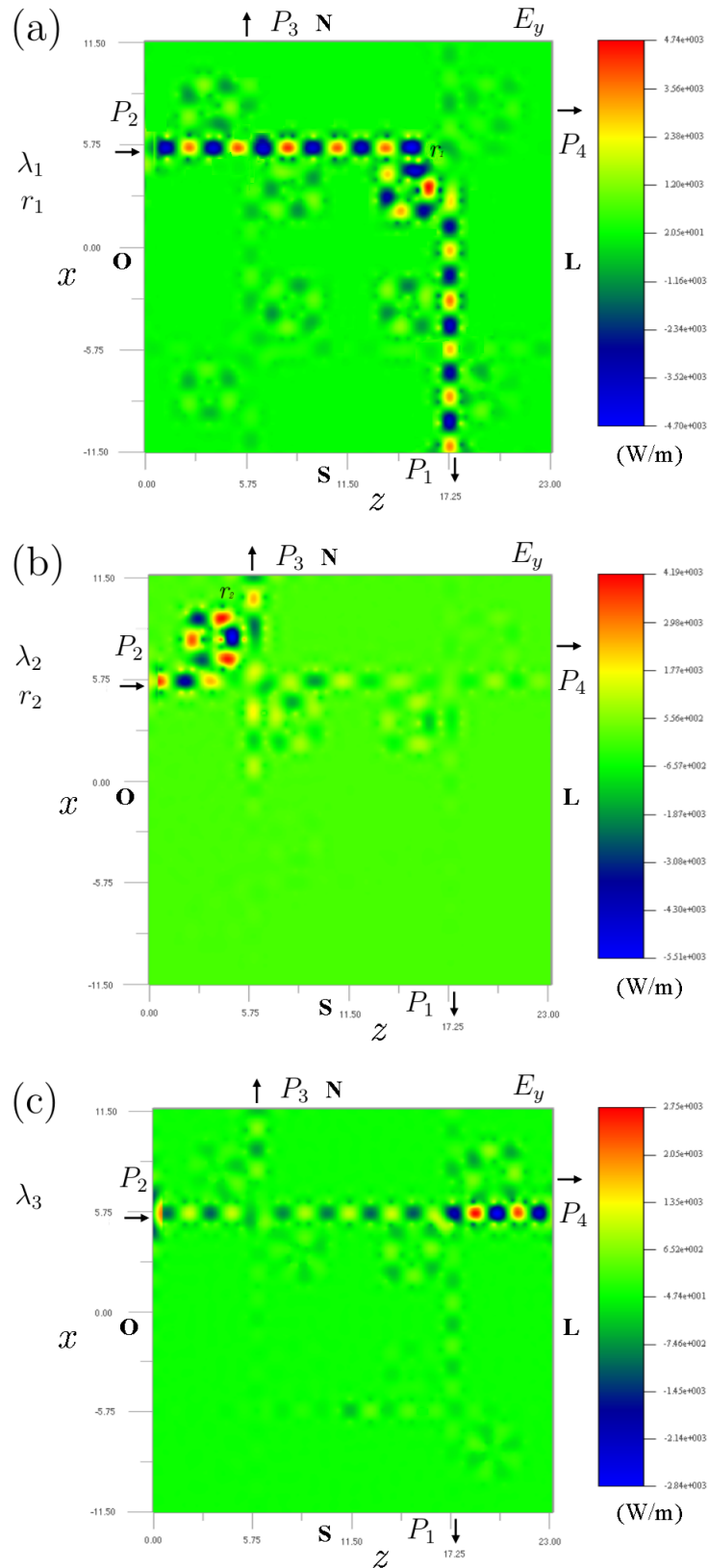
Considera-se a rede quadrada bidimensional de cristais fotônicos constituída de hastes de silício, sendo utilizada para a composição da estrutura GWOR (4×4 PhCRR *router*), composta por quatro elementos básicos do tipo 2×2 em um *wafer* de dimensões $23 \mu\text{m} \times 23 \mu\text{m}$, nas direções x e z conforme ilustrado na Figura 43.

Figura 43. *Design* da estrutura de composição GWOR (4×4 PhCRR *router*), composta por quatro estruturas básicas 2×2 , formando 12 pares de entrada-saída possíveis.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Figura 44. Simulação da distribuição do campo elétrico E_y na estrutura 4×4 baseada em cristais fotônicos, quando o sinal óptico é acionado na porta P_2 (O), para os casos (a) λ_1, r_1 ; (b) λ_2, r_2 e (c) λ_3 .



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Em uma matriz quadrada de comunicação, diversas topologias são possíveis, quando são baseadas na conexão entre os vários blocos básicos construtivos do tipo 2×2 . Na implementação numérica da estrutura GWOR, os componentes convencionais de guia de ondas, tais como, os cruzamentos dos guias, curvas e ressoadores, são então substituídos por componentes equivalentes baseados em cristais fotônicos, que são adequadamente projetados.

A Figura 43 mostra o roteador de comprimento de onda 4×4 proposto, baseado em anéis ressoadores, e projetado por meio da repetição do bloco de construção básico do tipo 2×2 .

Considerando o funcionamento da estrutura para a topologia de roteador 4×4 proposto, não são permitidos os *links* correspondentes à mesma porta de entrada e saída. Por exemplo, conforme a Figura 44, se um sinal de comprimento de onda $\lambda_1 = 1,7 \mu\text{m}$ é acionado na porta de entrada P_2 (O), então este sinal chegará na porta de saída P_1 (S), sendo desviado pelo PhCRR ressonante cujo raio das hastes internas é $r_1 = 0,2a$. De outra maneira, se um outro sinal no comprimento de onda $\lambda_2 = 1,721 \mu\text{m}$ for acionado na mesma porta de entrada P_2 (O), então este sinal será roteado para a porta de saída P_3 (N), sendo então desviado pelo PhCRR ressonante cujo raio das hastes internas é $r_2 = 0,24a$. Finalmente, se um terceiro comprimento de onda, no caso $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$, for utilizado como sinal de entrada na porta P_2 (O), então este será transmitido na porta de saída P_4 (L). O sentido das setas denota as portas de entrada e saída.

No comprimento de onda operacional $\lambda_1 = 1,7 \mu\text{m}$, os valores do *crosstalk* entre a porta passante P_1 (S) e as portas isoladas P_3 (N) e P_4 (L) são dados por $Ct_{1,3} = -45,46 \text{ dB}$ (S-N) e $Ct_{1,4} = -31,67 \text{ dB}$ (S-L), respectivamente. No comprimento de onda $\lambda_2 = 1,721 \mu\text{m}$, a porta passante é P_3 (N), enquanto que as portas isoladas são P_1 (S) e P_4 (L), resultando em valores de *crosstalk* respectivamente iguais a $Ct_{3,1} = -28,591 \text{ dB}$ (N-S) e $Ct_{3,4} = -39,465 \text{ dB}$ (N-L). Finalmente, com $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$, a porta passante é P_4 (L), enquanto que as portas isoladas são identificadas em P_1 (S) e P_3 (N), resultando nos valores de *crosstalk* entre as portas de cerca de $Ct_{4,1} = -23,799 \text{ dB}$ (L-S) e $Ct_{4,3} = -27,657 \text{ dB}$ (L-N), respectivamente. Os valores máximos para a perda de inserção são iguais a $IL_1 \cong -1,472 \text{ dB}$, $IL_3 \cong -0,677 \text{ dB}$ e $IL_4 \cong -1,165 \text{ dB}$, para os comprimentos de onda λ_1 , λ_2 e λ_3 , respectivamente. Estes resultados estão reunidos na Tabela 16.

Todos os 12 *links* entre as portas de entrada e saída estão ilustrados na Tabela 16. Na Tabela 15 pode-se verificar que não é permitido autocomunicação na estrutura, ou seja, um mesmo sinal de *input* I_1 (P_1) não irá para o *output* O_1 (P_1), com $P_i(I_i, O_i)$ denotando uma porta bidirecional, em que $I_i(O_i)$ representa uma porta de entrada (saída), com $i \in \{1, 2, 3, 4\}$. Da mesma maneira, um mesmo sinal de *input* I_2 (P_2) não irá para o *output* O_2 (P_2), um mesmo sinal de *input* I_3 (P_3) não irá para o *output* O_3 (P_3) e, por último, um mesmo sinal de *input* I_4 (P_4) não irá para o *output* O_4 (P_4).

Tabela 15. Todos os *links* esperados para a estrutura GWOR 4×4 .

Sinal de Entrada I_i	Sinal de Saída O_i			
	P_1	P_2	P_3	P_4
P_1	—	λ_1	λ_3	λ_2
P_2	λ_1	—	λ_2	λ_3
P_3	λ_3	λ_2	—	λ_1
P_4	λ_2	λ_3	λ_1	—

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Tabela 16. Resumo dos resultados simulados para a estrutura GWOR 4×4 .

Figura 44 (a) λ_1, r_1	Figura 44 (b) λ_2, r_2	Figura 44 (c) λ_3
$Ct_{1,3} = -45,46$ dB (S-N)	$Ct_{3,1} = -28,591$ dB (N-S)	$Ct_{4,1} = -23,799$ dB (L-S)
$Ct_{1,4} = -31,67$ dB (S-L)	$Ct_{3,4} = -39,465$ dB (N-L)	$Ct_{4,3} = -27,657$ dB (L-N)
$IL_1 \cong -1,472$ dB	$IL_3 \cong -0,677$ dB	$IL_4 \cong -1,165$ dB

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

6.4 Conclusão

Os roteadores ópticos compactos são os componentes essenciais para as NoCs fotônicas. O roteamento sem bloqueio é obtido projetando-se PhCRRs e posicionando-os exatamente nos cantos do roteador, para que todos os sinais de entrada possam ser roteados para as portas de saída pretendidas.

De acordo com o esquema de simulação (para $r_i = r_1$) e os resultados numéricos apresentados para a estrutura do tipo 2×2 , o sinal óptico acionado na porta P_1 (S) é transmitido na porta P_2 (O), pois o seu comprimento de onda é coincidente com uma das ressonâncias dos dois PhCRRs (no caso λ_1), enquanto que todos os outros comprimentos de onda (λ_2, λ_3) são transmitidos na porta P_3 (N). Da mesma maneira, o sinal óptico acionado na porta P_3 (N) é transmitido na porta P_4 (L), pois o seu comprimento de onda é coincidente com uma das ressonâncias dos PhCRRs (no caso λ_1), e em caso contrário, λ_2 e λ_3 serão transmitidos na porta P_1 (S). O comportamento do *switch* 2×2 é recíproco no sentido de que os sinais acionados nas portas P_2 e P_4 saem nas portas P_1 e P_3 , respectivamente, nos comprimentos de onda ressonantes dos PhCRRs.

A simetria do dispositivo de composição 4×4 resultante do arranjo quadrado das hastes de silício com grafeno, proporciona um desempenho individual para os PhCRRs que compõem uma única estrutura 2×2 .

Considerando os dois sentidos de propagação da estrutura básica, conforme descritos pelas Figuras 32 e 34, a configuração de composição do GWOR 4×4 apresenta um desempenho específico e balanceado da energia que é confinada nos guias de onda ortogonais, conforme pode ser observado nos resultados obtidos para a transmitância nas portas P_2 , P_3 e P_4 .

A estrutura GWOR 4×4 composta por quatro estruturas do tipo 2×2 pode preservar proporcionalmente o desempenho obtido pela estrutura 2×2 , implicando em um desempenho adequado para uma rede GWOR, por exemplo, quando todas as portas recebem sinal. De acordo com as simulações numéricas realizadas pelo método 2D FDTD, a estrutura 4×4 apresenta um *Crosstalk* relativamente baixo entre as portas.

Com efeito, os guias de onda ortogonais que são baseados em uma rede quadrada de cristais fotônicos, além de apresentarem uma alta taxa de confinamento, propiciam uma alta capacidade de integração entre os diferentes dispositivos ou componentes de redes ópticas em *chips* (ONoCs), no sentido em que a composição aumenta proporcionalmente as dimensões finais da estrutura durante o *design*, por exemplo, a estrutura 4×4 , composta por 4 estruturas básicas 2×2 apresenta um *footprint* proporcional ao *footprint* da estrutura básica 2×2 , ilustrada na Figura 32.

Além do mais, a cada nova reconfiguração para a montagem de outras estruturas de ordem superior (ou inferior), a geometria proporcionada pelo cruzamento de guias de onda ortogonais causará um aumento (ou redução) proporcional para a estrutura final nas direções x e z , ou em outras palavras, uma estrutura do tipo $N \times N$ baseada em cristal fotônico em uma rede quadrada de hastes, demandará baixo *footprint*, com várias possibilidades de *design* e aplicações ocasionadas pela simetria resultante, contribuindo com a miniaturização e integração adequadas para as redes roteadas em *chips*.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho, explorou-se as propriedades fundamentais dos cristais fotônicos com uma periodicidade bidimensional, visando aplicações em projetos de circuitos integrados fotônicos e sistemas computacionais. Foram realizadas inúmeras simulações com o intuito de analisar numericamente a performance das estruturas propostas. As estruturas são: a porta lógica NAND e os roteadores de comprimento de onda, 2×2 e 4×4 . Ambas as aplicações podem ser utilizadas para circuitos integrados fotônicos e sistemas computacionais.

As portas lógicas totalmente ópticas desempenham um papel muito importante em sistemas de comunicações ópticas, uma vez que são os elementos básicos no processamento de sinais ópticos. Estas estruturas são soluções para todas as limitações no sistema de comunicação eletrônico e atendem às crescentes demandas de processadores de sinais em terahertz, sendo esse talvez o principal obstáculo da eletrônica. Há uma série de métodos para se projetar as AOLGs, entre os quais, os amplificadores ópticos semicondutores e os interferômetros que são baseados em guias de onda ópticos, no entanto, todos apresentam alguns inconvenientes, pois não podem ser utilizados para circuitos integrados fotônicos, devido às grandes dimensões e o elevado consumo de energia pela estrutura.

Considerando que as AOLGs são baseadas em cristais fotônicos, apresentando um simples *design* para as estruturas, estas portas lógicas podem ser utilizadas para circuitos integrados fotônicos, sendo amplamente estudadas para a obtenção e análise de várias funções Booleanas.

Neste trabalho, a funcionalidade NAND foi analisada. Em comparação com outras estruturas, a porta NAND proposta pode trabalhar com um baixo consumo de energia, e o seu desempenho permite que a estrutura seja utilizada nas aplicações em circuitos integrados ópticos, em operações ópticas ultrarrápidas e em sistemas de processamento digitais.

Além do mais, os roteadores de comprimento de onda 2×2 , estruturas baseadas em ressoadores ópticos de cristais fotônicos, foram analisados numericamente. As simulações foram realizadas por meio dos métodos PWE e FDTD, utilizados para analisar todas as aplicações desenvolvidas. Os resultados apresentados para a estrutura 2×2 , proposta com 12 hastes de grafeno na sua parte central, demonstram um funcionamento esperado, de modo que a estrutura pode ser utilizada como um bloco básico para compor redes ópticas de ordem superior.

De fato, como um exemplo de uma estrutura de ordem superior que pode ser obtida pela montagem de blocos básicos 2×2 , apresentou-se o *design*, a simulação e a análise de uma rede GWOR do tipo 4×4 .

O projeto do roteador proposto comporta-se como um bloco básico de construção para a concepção de matrizes de ordem superior. Conforme os resultados das simulações realizadas em uma matriz de composição 4×4 , composta por quatro roteadores 2×2 , o *crosstalk* máximo obtido entre as portas conectadas, com hastes internas $r_1 = 0,2a$ e $r_2 = 0,24a$, foi de $Ct_{máx.} \cong -9,607$ dB, para os comprimentos de onda λ_1 , λ_2 e λ_3 , enquanto que o valor máximo para a perda de inserção foi de $IL_{máx.} \cong 0,069$ dB, em uma matriz de roteamento muito compacta, de $23 \mu\text{m} \times 23 \mu\text{m}$.

Utilizando-se da mesma estrutura fundamental, conforme a Figura 30, e alterando-se a geometria e/ou a posição entre os guias de onda e os ressoadores, ou por meio da exclusão ou da inclusão dos guias de onda ou dos ressoadores, ou por meio da criação de defeitos pontuais (adicionando, removendo ou variando o raio das hastes dielétricas) na estrutura ou, particularmente, pela inserção adequada de outros materiais, estas alterações poderão resultar em outras portas lógicas totalmente ópticas. Da mesma forma, utilizando-se do bloco básico de composição 2×2 , conforme representado pela Figura 33, novas estruturas de redes ópticas de ordem superior poderão ser obtidas, tais como a rede GWOR 6×6 .

7.1 Publicações

Até este momento de conclusão deste trabalho, foram desenvolvidos e publicados em periódicos, ou foram submetidos, os seguintes artigos completos:

- Almeida, L. C. P. de, Sousa, F. B., Junior, W. G. P., Costa, M. B. C., “2D-FDTD Electromagnetic Simulation of an Ultracompact All-Optical Logic Gate Based on 2D Photonic Crystal for Ultrafast Applications,” *Journal of Communication and Information Systems*, [S. l.], v. 39, n. 1, p. 35–45, 2024. DOI: 10.14209/jcis.2024.4. Disponível em: <https://jcis.sbrc.org.br/jcis/article/view/867>;
- Almeida, L. C. P. de, de, Junior, W. G. P., Costa, M. B. C., “Design and Analysis of Photonic Crystal Wavelength Routers based on Graphene as the basic building blocks for Optical Networks-on-Chip,” *Journal of Communication and Information Systems*, 2025.

Foram publicados em eventos, ou foram submetidos, os seguintes trabalhos:

- Araújo, F. S. de, Sousa, F. B. de, Silva, A. R., Tavares, S. C. C., Almeida, L. C. P. de, *et al.*, “Performance Analysis of an Optical System with Mach-Zehnder Interferometer and Semiconductor Optical Amplifier,” In: XVIII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology (SEMINATEC), São Paulo, 2024.

Referências

- [1] John D. Joannopoulos, Steven G. Johnson, Joshua N. Winn, Robert D. Meade, “Photonic Crystals: Molding the Flow of Light,” Copyright by Princeton University Press, 2008.
- [2] S. G. Johnson, J. D. Joannopoulos, “Photonic Crystals: The Road from Theory to Practice,” Kluwer Academic Publishers, Boston, 2003.
- [3] A. Lugnan, A. Katumba, F. Laporte, M. Freiburger, S. Sackesyn, C. Ma, E. Gooskens, J. Dambre, P. Bienstman, “Photonic neuromorphic information processing and reservoir computing,” *APL Photonics*, 5 (2): 020901, 1 February, 2020.
- [4] Y. C. Song, Y. Gao, G. Wang, Y. Chen, P. Xu, C. Gu, Y. Shi, X. Shen, “Compact nonvolatile 2×2 photonic switch based on two-mode interference,” *Opt. Express*, 30, 2022.
- [5] G.-H. Lee, H. Moon, H. Kim, G. Hwang Lee, W. Kwon, S. Yoo, D. Myung, S. Hyun Yun, Z. Bao, S. Kwang Hahn, “Multifunctional materials for implantable and wearable photonic healthcare devices,” *Nature Reviews Materials*, 5 (2): 149–165, 2020.
- [6] E. H. Shaik, R. Nakkeeran, “Multi-mode interference-based photonic crystal logic gates with simple structure and improved contrast ratio,” *Photonic Network Communications*, 34 (1): 140–148, 2017.
- [7] H. Mondal, *et al.*, “Design and simulation of phase shifter based on multimode interference in photonic crystal waveguide,” *The European Physical Journal D*, v. 77, 2023.
- [8] C. Tang, X. Dou, Y. Lin, H. Yin, B. Wu, Q. Zhao, “Design of all-optical logic gates avoiding external phase shifters in a two-dimensional photonic crystal based on multi-mode interference for BPSK signals,” *Optics Communications*, v. 316, no. 7, pp. 49–55, 2014.
- [9] X. Susan Christina, A. P. Kabilan, “Design of optical logic gates using self-collimated beams in 2D photonic crystal,” *Photonic Sensors*, 2 (2): 173–179, 2012.
- [10] R. Fan, X. Yang, X. Meng, X. Sun, “2D photonic crystal logic gates based on self-collimated effect,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49 (32): 325104, 2016.
- [11] M. R. Jalali-Azizpoor, M. Soroosh, Y. Seifi-Kavian, “Application of self-collimated beams in realizing all-optical photonic crystal-based half-adder,” *Photonic Network Communications*, 36 (3): 344–349, 2018.
- [12] W. Liu, D. Yang, G. Shen, H. Tian, Y. Ji, “Design of ultra compact all-optical XOR, XNOR, NAND and OR gates using photonic crystal multi-mode interference waveguides,” *Optics & Laser Technology*, (50): 55–64, 2013.

- [13] A. Kotb, C. Guo, "Numerical modeling of photonic crystal semiconductor optical amplifiers-based 160 Gb/s all-optical NOR and XNOR logic gates," *Optical and Quantum Electronics*, 52 (2): 89, 2020.
- [14] N. L. Kazanskiy, M. A. Butt, S. N. Khonina, "2D-Heterostructure Photonic Crystal Formation for On-Chip Polarization Division Multiplexing," *Photonics*, 8, 313, 2021.
- [15] A. Askarian, F. Parandin, "Investigations of all-optical gates based on linear photonic crystals using the PSK technique and beam interference effect," *Electromagnetics*, 1–18, 2023.
- [16] D. Saranya, R. Anbazhagan, "Design and analysis of optical logic gates based on trifurcation structured 2D photonic crystals," *Optical and Quantum Electronics*, 52, 370, 2020.
- [17] M. Rachana, S. Swarnakar, S. Vamshi Krishna, S. Kumar, "Design and analysis of an optical three-input AND gate using a photonic crystal fiber," *Applied Optics* 61 (1), 77–83, 2022.
- [18] T. Kavitha, C. Kanmani Pappa, R. Shobana, A. Albert Raj, A. Ahilan, B. Veerasamy, A. Jasmine Gnanamalar, "Advanced day lighting system using fiber optics," *Optical and Quantum Electronics*, 55, 525, 6, 2023.
- [19] B. M. Kumar, R. K. R. Guduru, A. Srinivas, F. Ana, K. Ramudu, G. Dhiman, "Wavelength assignment in optical fiber with intelligent optimization and assignment scheme for static and dynamic traffic intensity based Photonic networks," *Optical and Quantum Electronics*, 54, 526, 15 July, 2022.
- [20] T. Datta, Mrinal Sen, "Raman mediated ultrafast all-optical NOR gate," *Applied Optics*, 59 (21): 6352–6359, 2020.
- [21] S. Swarnakar, S. K. Reddy, R. Harijan, S. Kumar, "Design and modelling of all-optical NAND gate using metal-insulator-metal (MIM) waveguides-based Mach-Zehnder interferometers for high-speed information processing," *Optical and Quantum Electronics*, 53, 493, 14 August, 2021.
- [22] Costa, M. B. C., "Análise numérica do acoplador duplo não-linear baseado em fibras de cristais fotônicos (NLDC-PCF) operando com PAM e PWM para obtenção de portas lógicas", Tese de doutorado, 2013.
- [23] M. A. Butt, S. N. Khonina, N. L. Kazanskiy, "Recent advances in photonic crystal optical devices: A review," *Optics and Laser Technology*, v. 142, 107265, 2021.
- [24] N. Maria D'souza, V. Mathew, "Interference based square lattice photonic crystal logic gates working with different wavelengths," *Optics & Laser Technology*, (80): 214–219, 2016.

- [25] K. Fasihi, "Design and simulation of linear logic gates in the two-dimensional square-lattice photonic crystals," *Optik*, 127 (11): 4669–4674, 2016.
- [26] Hussein M. E. Hussein, Tamer A. Ali, Nadia H. Rafat, "New designs of a complete set of photonic crystals logic gates," *Optics Communications*, (411): 175–181, 2018.
- [27] P. Rani, S. Fatima, Y. Kalra, R. K. Sinha, "Realization of all optical logic gates using universal NAND gates on photonic crystal platform," *Superlattices and Microstructures*, (109): 619–625, 01 September, 2017.
- [28] M. Neisy, M. Soroosh, K. Ansari-Asl, "All optical half adder based on photonic crystal resonant cavities," *Photonic Network Communications*, 35 (2): 245–250, 2018.
- [29] M. Pirzadi, A. Mir, D. Bodaghi, "Realization of ultra-accurate and compact all-optical photonic crystal OR logic gate," *IEEE Photonics Technology Letters*, 28 (21): 2387–2390, 01 November, 2016.
- [30] A. Mohebzadeh-Bahabady, S. Olyaei, "Proposal of a Cascade Photonic Crystal XOR Logic Gate for Optical Integrated Circuits with Investigation of Fabrication Error and Optical Power Changes," *Photonics*, 8, 392, 2021.
- [31] L. Liu, J. Dong, D. Gao, A. Zheng, X. Zhang, "On-chip passive three-port circuit of all-optical ordered-route transmission," *Scientific Reports*, 5, 1–9, 2015.
- [32] T. Sridarshini, S. I. Gandhi, "Compact 3×3 wavelength routing for photonic integrated circuits," *Photonic Network Communications*, 36 (1), 68–81, 2018.
- [33] T. Sridarshini, S. I. Gandhi, M. Rakshitha, "Design and analysis of $1 \times N$ symmetrical optical splitters for photonic integrated circuits," *Optik*, 169, 321–331, 2018.
- [34] D. Shanmuga Sundar, C. Umamaheswari, T. Sridarshini, M. Karthikeyan, R. Sitharthan, A. Sivanantha Raja, M. Flores Carrasco, "Compact four-port circulator based on 2D photonic crystals with a 90° rotation of the light wave for photonic integrated circuits applications," *Laser Physics*, 29 (6), 066201, 2019.
- [35] R. Sathyadevaki, D. S. sundar, A. S. Raja, "Design of dual ring wavelength filters for WDM applications," *Optics Communications*, 380, 409–418, 2016.
- [36] F. Haddadan, M. Soroosh, N. Alaei-Sheini, "Designing an electro-optical encoder based on photonic crystals using the stacks," *Applied Optics*, 59 (7), pp. 2179–2185, 2020.
- [37] T. Daghooghi, M. Soroosh, K. Ansari-Asl, "Ultra-fast all-optical decoder based on nonlinear photonic crystal ring resonators," *Applied Optics*, 57 (9), 2250–2257, 2018.
- [38] J. Lu, H. Ren, S. Guo, Z. Wu, Y. Qin, W. Hu, C. Jiang, "Wavelength routers with low crosstalk using photonic crystal point defect micro-cavities," *Optik*, 127 (6), 3235–3242, 2016.

- [39] Z. Yu, Q. Zhang, X. Jin, J. Zhao, H. Baghsiahi, D. R. Selviah, “Microring resonator-based optical router for photonic networks-on-chip,” *Quantum Electronics*, 46 (7), 2016.
- [40] Y. Zhang, Y. Zhang, B. Li, “Optical switches and logic gates based on self-collimated beams in two-dimensional photonic crystals,” *Optics Express*, v. 15, no. 15, pp. 9287–9292, 2007.
- [41] J. Bao, J. Xiao, L. Fan, X. Li, Y. Hai, T. Zhang, C. Yang, “All-optical NOR and NAND gates based on photonic crystal ring resonator,” *Optics Communications*, v. 329, no. 20, pp. 109–112, 2014.
- [42] W. D. Callister, “*Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*,” John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [43] B. Vakili, S. Bahadori-Haghighi, R. Ghayour, “All-optical switching using a new photonic crystal directional coupler,” *Advanced Electromagnetics*, v. 4, no. 1, July, 2015.
- [44] K. M. Ho, C. T. Chan, C. M. Soukoulis, “Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures,” *Physical Review Letters*, v. 65, n. 25, pp. 3152–3155, 1990.
- [45] R. D. Meade, K. D. Brommer, A. M. Rappe, J. D. Joannopoulos, “Existence of a photonic band gap in two dimensions,” *Applied Physics Letters*, v. 61, n. 4, pp. 495–497, 1992.
- [46] P. Vukusic, J. R. Sambles, “Photonic structures in Biology,” *Nature*, v. 424, pp. 852–855, 14 August, 2003.
- [47] S. F. Preble, H. Lipson, M. F. Lipson, “Novel two-dimensional photonic crystals designed by evolutionary algorithms,” *Proceedings SPIE v. 5597, Nanophotonics for Communication: Materials and Devices. Proc. of SPIE*, v. 5597, pp. 118–128, 2004.
- [48] S. Preble, M. Lipson, H. Lipson, “Two-dimensional photonic crystals designed by evolutionary algorithms,” *Applied Physics Letters*, 86 (6), 061111, 2005.
- [49] P. Vukusic, I. Hooper, “Directionally Controlled Fluorescence Emission in Butterflies,” *Science*, v. 310, p. 1151, 2005.
- [50] P. Vukusic, D. G. Stavenga, “Physical methods for investigating structural colours in biological systems,” *Journal of The Royal Society Interface*, v. 6, n. Suppl 2, pp. S133–S148, 21 January, 2009.
- [51] A. Saito, M. Nakajima, Y. Miyamura, K. Sogo, Y. Ishikawa, Y. Hirai, “Morpho-blue reproduced by nanocasting lithography,” *Proceedings SPIE, Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, and Devices III*, v. 6327, 2006.
- [52] A. Saito, Y. Miyamura, M. Nakajima, Y. Ishikawa, K. Sogo; Y. Kuwahara, Y. Hirai, “Reproduction of the Morpho blue by nanocasting lithography,” *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 24 (6), 3248, 2006.

- [53] D. R. Smith, J. B. Pendry, M. C. K. Wiltshire, “Metamaterials and negative refractive index,” *Science*, 305: 788–792, 2004.
- [54] L. Rayleigh, “On the maintenance of vibrations by forces of double frequency, and on the propagation of waves through a medium endowed with a periodic structure,” *Philosophical Magazine*, v. 24, pp. 145–159, 1887.
- [55] T. H. Maiman, “Maser Behavior: Temperature and Concentration Effects,” *Journal of Applied Physics*,” 31 (1): 222–223, 1 January, 1960.
- [56] A. L. Schawlow, C. H. Townes, “Infrared and Optical Masers,” *Physical Review*, 112, pp. 1940–1949, 15 December, 1958.
- [57] V. P. Bykov, “Spontaneous emission in a periodic structure,” *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, v. 35, pp. 269–273, August, 1972.
- [58] S. John, “Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices,” *Physical Review Letters*, v. 58, no. 23, pp. 2486–2489, 1987.
- [59] E. Yablonovich, “Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics,” *Physical Review Letters*, v. 58, no. 20, pp. 2059–2062, 1987.
- [60] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter, K. M. Leung, “Photonic band structure: the face-centered cubic case employing nonspherical atoms,” *Physical Review Letters*, v. 67, n. 17, pp. 2295–2298, 21 October, 1991.
- [61] K. Okamoto, “Fundamentals of Optical Waveguides,” Academic Press, Second Edition, 2006.
- [62] J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, D. M. Atkin, “All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding,” *Optics Letters*, 21, 1547–1549, 1996.
- [63] J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, D. M. Atkin, “Pure silica single-mode fiber with hexagonal photonic crystal cladding,” *Optical Fiber Communication Conference, San Jose. Proceedings-SPIE*, 1996.
- [64] S. Kinoshita, S. Yoshioka, “Structural colors in nature: the role of regularity and irregularity in the structure,” *ChemPhysChem*, v. 6, no. 8, pp. 1443–1459, 2005.
- [65] K. Sakoda, “Optical Properties of Photonic Crystals,” Springer-Verlag Berlin, v. 80, 2nd ed., 2005.
- [66] Y. Su, Y. Zhang, C. Qiu, X. Guo, L. Sun, “Silicon Photonics: Silicon Photonic Platform for Passive Waveguide Devices: Materials, Fabrication, and Applications,” *Issue 8, Advanced Materials Technologies*, 5: 2070046, 2020.

- [67] B. Monney, C. Kilchoer, C. Weder, “Photolithographic Fabrication of Mechanically Adaptive Devices,” *ACS Polymers Au*, 2 (1), 50–58, 2022.
- [68] T. Stomeo, M. Grande, A. Qualtieri, A. Passaseo, A. Salhi, M. De Vittorio, D. Biallo, A. D’orazio, M. De Sario, V. Marrocco, V. Petruzzelli, F. Prudenzeno, “Fabrication of force sensors based on two-dimensional photonic crystal technology,” *Microelectronic Engineering*, 84 (5–8): 1450–1453, 2007.
- [69] S. G. Johnson, S. Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos, L. A. Kolodziejski, “Guided modes in photonic crystal slabs,” *Physical Review B*, 60 (8): 5751, 1999.
- [70] M. Qi, E. Lidorikis, P. T. Rakich, S. G. Johnson, J. D. Joannopoulos, E. P. Ippen, H. I. Smith, “A three-dimensional optical photonic crystal with designed point defects,” *Nature*, 429 (6991): 538–542, 2004.
- [71] K. Ishizaki, M. Koumura, K. Suzuki, K. Gondaira, S. Noda, “Realization of three-dimensional guiding of photons in photonic crystals,” *Nature Photonics*, 7 (2): 133, 2013.
- [72] A. K. Geim, K. S. Novoselov, “The rise of graphene,” *Nature Materials*, 6(3), 183–191, 2007.
- [73] F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan, A. C. Ferrari, “Graphene photonics and optoelectronics,” *Nat. Photonics*, 4(9), pp. 611–622, 2010.
- [74] C. Lee, X. Wei, J. W. Kysar, J. Hone, “Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene,” *Science*, 321(5887), pp.385–388, 2008.
- [75] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos, A. A. Firsov, “Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene,” *Nature*, 438(7065), pp. 197–200, 2005.
- [76] Z. Han, X. Ruan, “Thermal conductivity of monolayer graphene: Convergent and lower than diamond,” *Physical Review B*, v. 108, L121412, 2023.
- [77] Y. Lu, “Two-Dimensional Materials in Nanophotonics: Developments, Devices, and Applications,” Jenny Stanford Publishing, 2020.
- [78] R. Saito, G. Dresselhaus and M. S. Dresselhaus, “Physical Properties of Carbon Nanotubes,” Imperial College Press, London, 1998.
- [79] S. K. Pati, T. Enoki and C. N. R. Rao, “Graphene and its fascinating attributes,” World Scientific, 2011.
- [80] G. W. Hanson, “Dyadic Green’s functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene,” *Journal of Applied Physics*, v. 103, no. 6, p. 064302, 2008.
- [81] A. K. Geim, K. S. Novoselov, “The rise of graphene,” *Nature materials*, 6, 183-191, 2007.

- [82] G. L. Klimchitskaya, V. M. Mostepanenko, “Conductivity of pure graphene: Theoretical approach using the polarization tensor,” *Physical Review B*, 93(24), 2016.
- [83] R. R. Nair, P. Blake, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, T. J. Booth, T. Stauber, N. M. R. Peres, A. K. Geim, “Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene,” *Science*, 320 (5881), 1308–1308, 2008.
- [84] A. B. Kuzmenko, E. van Heumen, F. Carbone, D. van der Marel, “Universal Optical Conductance of Graphite,” *Physical Review Letters*, 100 (11), 2008.
- [85] D. A. B. Miller, “Device requirements for digital optical processing in Digital Optical Computing,” Ed. R. A. Athale, *SPIE Critical Reviews of Optical Science and Technology*, CR35, 68, 1990.
- [86] R. Soref, “The Past, Present, and Future of Silicon Photonics,” in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 13(4), 102-112, 2007.
- [87] H. Cheng, S. Tong, X. Deng, H. Liu, Y. Du, C. He, P. Qiu, K. Wang, “Deep-brain 2-photon fluorescence microscopy in vivo excited at the 1700 nm window,” *Opt. Lett.*, 44 (17), 4432–4435, 2019.
- [88] X. Mu, *et al.*, “Edge Couplers in Silicon Photonic Integrated Circuits: A Review,” *Applied Sciences* 10, no. 4: 1538, 2020.
- [89] U. Parali, C. Pinar, “Numerical analysis of pump-signal-direction effect on the performance of EDFA systems,” *Engineering Computations*, v. 37 n. 4, pp. 1155–1178, 2020.
- [90] A. Altuncu, *et al.*, “Design and Characterization of High Performance C and L Band Erbium Doped Fiber Amplifiers (C, L-EDFAs),” 2005.
- [91] M. A. Butt, *et al.*, “Recent advances in photonic crystal optical devices: A review,” *Optics & Laser Technology*, v. 142, 2021.
- [92] P. Andalib, N. Granpayeh, “All-optical ultracompact photonic crystal NOR gate based on nonlinear ring resonators,” *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, v. 11, n. 8, 2009.
- [93] S. Y. Siew, *et al.*, “Review of Silicon Photonics Technology and Platform Development,” *Journal of Lightwave Technology*, v. 39, 4374-4389, 2021.
- [94] J. F. Wakerly, “Digital Design: Principles and Practices,” Published by Pearson, 2021.
- [95] “IEEE Standard for Logic Circuit Diagrams,” in *ANSI/IEEE Std 991-1986*, n., pp. 1–88, 1986.
- [96] “IEEE Graphic Symbols for Logic Functions (Includes IEEE Std 91A-1991 Supplement, and IEEE Std 91-1984),” in *IEEE Std 91a-1991 & IEEE Std 91-1984*, 1991.

- [97] J. Bird, "Engineering Mathematics," Published by Routledge, pp. 742, 2021.
- [98] C. F. Lam, "Passive Optical Networks: Principles and Practice," Elsevier, pp. 368, 2011.
- [99] H. S. Abbas, M. A. Gregory, "The next generation of passive optical networks: A review," *Journal of Network and Computer Applications*, v. 67, pp. 53–74, May 2016.
- [100] T. Horvath, P. Munster, V. Oujezsky, N.-H. Bao, "Passive Optical Networks Progress: A Tutorial," *Electronics*, 9, n. 7, 1081, 2020.
- [101] F. Rodrigues, C. Rodrigues, J. Santos, C. Rodrigues, A. Teixeira, "Photonic Integrated Circuits for Passive Optical Networks: Outlook and Case Study of Integrated Quasi-Coherent Receiver," *Photonics*, v. 10, 182, 8 February 2023.
- [102] J. Lexau, X. Zheng, J. Bergey, A. V. Krishnamoorthy, R. Ho, R. Drost, J. Cunningham, "CMOS Integration of Capacitive, Optical, and Electrical Interconnects," *IEEE International Conference on Interconnect Technology*, Burlingame, CA, USA, pp. 78–80, 2007.
- [103] R. G. Beausoleil, P. J. Kuekes, G. S. Snider, S.-Y. Wang, R. S. Williams, "Nanoelectronic and Nanophotonic Interconnect," in *Proceedings of the IEEE*, v. 96, n. 2, pp. 230–247, Feb. 2008.
- [104] A. Biberman, K. Bergman, "Optical interconnection networks for high-performance computing systems," *Reports on Progress in Physics*, v. 75, 2012.
- [105] A. Shacham, K. Bergman, L. P. Carloni, "On the Design of a Photonic Network-on-Chip," *First International Symposium on Networks-on-Chip, (NOCS'07)*, Princeton, NJ, USA, pp. 53–64, 2007.
- [106] M. Zavvari, "Design of Photonic Crystal-Based Demultiplexer with High-Quality Factor for DWDM Applications," *Journal of Optical Communications*, v. 40, n. 2, pp. 135–138, 2019.
- [107] A. Dideban, H. Habibiyan, H. Ghafourifard, "Photonic crystal channel drop filter based on ring-shaped defects for DWDM systems," *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, v. 87, pp. 77–83, March 2017.
- [108] Y. Zhang, Y. Zhang, B. Li, "Optical switches and logic gates based on self-collimated beams in two-dimensional photonic crystals," *Optics Express*, v. 15, no. 15, pp. 9287–9292, 2007.
- [109] M. Yang, W. M. J. Green, S. Assefa, J. V. Campenhout, B. G. Lee, C. V. Jahnes, F. E. Doany, C. L. Schow, J. A. Kash, Y. A. Vlasov, "Non-Blocking Electro-Optic Silicon Switch for On-Chip Photonic Networks," *Optics Express*, v. 19, pp. 47–54, 2011.

- [110] A. V. Tsarev, F. D. Leonardis, V. M. N. Passaro, “Thin heterogeneous SOI waveguides for thermo-optical tuning and filtering,” *Optics Express*, v. 16, pp. 3101–3113, 2008.
- [111] L. Liu, J. Dong, D. Gao, A. Zheng, X. Zhang, “On-chip passive three-port circuit of all-optical ordered-route transmission,” in *Scientific Reports*, pp. 1–9, 2015.
- [112] A. Kazmierczak, W. Bogaerts, E. Drouard, F. Dortu, P. Rojo-Romeo, F. Gaffiot, D. V. Thourhout, D. Giannone, “Highly Integrated Optical Crossbar in Silicon-on-Insulator Technology,” *Journal of Lightwave Technology*, v. 27, pp. 3317–3323, 2009.
- [113] N. Kirman, J. F. Martinez, “A Power-efficient All-optical On-chip Interconnect Using Wavelength-based Oblivious Routing,” *ACM SIGARCH Computer Architecture News*, v. 38, n. 1, pp. 15–28, 2010.
- [114] A. R. Cowan, J. F. Young, “Mode matching for second-harmonic generation in photonic crystal waveguides,” *Physical Review B*, v. 65, pp. 085106, 7 February 2002.
- [115] Z. Qiang, W. Zhou, R. A. Soref, “Optical add-drop filters based on photonic crystal ring resonators,” *Optics Express*, 15, 1823–1831, 2007.
- [116] X. Zhang, J. Xing, P. Liu, Y. Luo, Z. Kang, “Realization of full and directional band gap design by non-gradient topology optimization in acoustic metamaterials,” *Extreme Mechanics Letters*, v. 42, January, 2021.
- [117] B. Wu, H. Zhang, P. Guo, Q. Wang, S. Chang, “Multifunctional photonic crystal cross waveguide for terahertz waves,” *Journal of the Optical Society of America B*, v. 27, n. 3, 2010.
- [118] M. Johnson, M. G. Thompson, D. Sahin, “Low-loss, low-crosstalk waveguide crossing for scalable integrated silicon photonics applications,” *Optics Express*, v. 28, n. 9, pp. 12498–12507, April 2020.
- [119] W. Y. Chiu, T. W. Huang, Y. H. Wu, F. H. Huang, Y.-J. Chan, C. H. Hou, H. T. Chien, C.-C. Chen, S. H. Chen, J. I. Chyi, “Directional coupler formed by photonic crystal InAlGaAs nanorods,” *Journal of Lightwave Technology*, v. 26, pp. 488–491, 2008.
- [120] C.-C. Chen, C.-Y. Chen, W.-K. Wang, F.-H. Huang, C.-K. Lin, W.-Y. Chiu, Y.-J. Chan, “Photonic crystal directional couplers formed by InAlGaAs nano-rods,” *Optics Express*, v. 13, pp. 38–43, 2005.
- [121] S. Noda, K. Kitamura, T. Okino, D. Yasuda, Y. Tanaka, “Photonic-Crystal Surface-Emitting Lasers: Review and Introduction of Modulated-Photonic Crystals,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, v. 23, n. 6, november/december 2017.
- [122] A. Truppel, *et al.*, “PSION+: Combining Logical Topology and Physical Layout Optimization for Wavelength-Routed ONoCs,” in *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, v. 39, n. 12, pp. 5197–5210, 04 February 2020.

- [123] I. O'Connor, M. Briere, E. Drouard, A. Kazmierczak, F. Tissafi-Drissi, D. Navarro, F. Mieyeville, J. Dambre, D. Stroobandt, J. Fédéli, Z. Lisik, F. Gaffiot, "Towards reconfigurable optical networks on chip," ReCoSoC'05 – Reconfigurable Communication-centric Systems-on-Chip, Computer Science, Engineering, Physics, pp. 121–128, 2005.
- [124] N. Sherwood-Droz, H. Wang, L. Chen, B. G. Lee, A. Biberman, K. Bergman, M. Lipson, "Optical 4×4 hitless silicon router for optical Networks-on-Chip (NoC)," *Optics Express*, v. 16, n. 20, pp. 15, 915–15922, Sep. 2008.
- [125] M. Ortín-Obón, L. Ramini, H. T. Fankem, V. Viñals, D. Bertozzi, "A Complete Electronic Network Interface Architecture for Global Contention-Free Communication over Emerging Optical Networks-on-Chip," in *GLSVLSI'14: Proceedings of the 24th Edition of the Great Lakes Symposium on VLSI*, pp. 267–272, May 2014.
- [126] A. Peano, L. Ramini, M. Gavanelli, M. Nonato, D. Bertozzi, "Design technology for fault-free and maximally-parallel wavelength-routed optical networks-on-chip," in *2016 IEEE/ACM ICCAD – International Conference on Computer-Aided Design*, pp. 1–8, Nov 2016.
- [127] M. Tala, M. Castellari, M. Balboni, D. Bertozzi, "Populating and exploring the design space of wavelength-routed optical network-on-chip topologies by leveraging the add-drop filtering primitive," in *2016 Tenth IEEE/ACM International Symposium on Networks-on-Chip (NOCS)*, pp. 1–8, Aug 2016.
- [128] K. M. Leung, Y. F. Liu, "Photon band structures: The plane-wave method," *Physical Review B*, v. 41, n. 14, pp. 10188–10190, 1990.
- [129] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter, "Photonic band structure: the face-centered-cubic case," *Physical Review Letters*, v. 63, n. 18, pp. 1950–1953, 1987.
- [130] J. Yonekura, M. Ikeda, T. Baba, "Analysis of finite 2D photonic crystals of columns and lightwave devices using the scattering matrix method," *Journal of Lightwave Technology*, v. 17, n. 8, pp. 1500–1508, 1999.
- [131] R. Y. Chan, J. M. Liu, "Time-domain wave propagation in optical structure," *IEEE Photonics Technology letters*, v. 6, n. 8, pp. 1001–1003, 1994.
- [132] A. Taflov, S. C. Hagness, "Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method," Norwood: Artech House, 2004.
- [133] K. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 14, n. 3, pp. 302–307, 1966.
- [134] M. Qiu, S. He, "Numerical method for computing defect modes in two dimensional photonic crystals with dielectric or metallic inclusions," *Physical Review B*, v. 61, pp. 12871–12876, 15 May 2000.

- [135] S. G. Johnson, J. D. Joannopoulos, “Block-iterative frequency domain methods for Maxwell’s equation in a plane wave basis,” *Optics Express*, v. 8, pp. 173–190, 2001.
- [136] S. D. Gedney, “An anisotropic perfectly matched layer-absorbing medium for the truncation of FDTD lattices,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 44, pp. 1630–1639, 1996.
- [137] S. Shi, C. Chen, D. W. Prather, “Plane-wave expansion method for calculating band structure of photonic crystal slabs with perfectly matched layers,” *Journal of the Optical Society of America A*, v. 21 (9), pp. 1769–1775, 2004.
- [138] H. Alipour-Banaei, S. Serajmohammadi, et al., “Band Gap Properties of Two-Dimensional Photonic Crystal Structures with Rectangular Lattice,” *Journal of Optical Communications*, v. 36, n. 2, pp. 109–114, 2015.
- [139] K. Elhachemi, N. Rafah, “A novel proposal based on 2D linear resonant cavity photonic crystals for all-optical NOT, XOR and XNOR logic gates,” *Journal of Optical Communications*, pp. 00010151520200184., 2020.
- [140] K. E. Muthu, *et al.*, “Design and analysis of 3-input NAND/NOR/XNOR gate based on 2D photonic crystals,” *Journal of Optical Communications*, 43 (2), 181–189, 2019.
- [141] A. Singh, *et al.*, “Design of optimized all-optical NAND gate using metal-insulator-metal waveguide,” *Optik*, v. 182, pp. 524–528, 2019.
- [142] R. Rigi, H. Sharifi, K. Navi, “Configurable all-optical photonic crystal XOR/AND and XNOR/NAND logic gates,” *Optical and Quantum Electronics*, 52, 339, 2020.
- [143] M. S. Bouaouina, M. R. Lebbal, “All optical photonic crystal encoder based on nonlinear Kerr effect with ultrahigh contrast ratio and low threshold power,” *Optical and Quantum Electronics*, 55, 867, 2023.
- [144] S. Swarnakar, *et al.*, “A novel structure of all-optical optimised NAND, NOR and XNOR logic gates employing a Y-shaped plasmonic waveguide for better performance and high-speed computations,” *Optical and Quantum Electronics*, 54, 530, 2022.
- [145] A. Sreevani, *et al.*, “Design and characteristic analysis of an all-optical AND, XOR, and XNOR Y-shaped MIM waveguide for high-speed information processing,” *Applied Optics*, v. 61, pp. 1212–1218, 2022.
- [146] E. G. Anagha, R. K. Jeyachitra, “An investigation on the cascaded operation of photonic crystal based all optical logic gates and verification of De Morgan’s law,” *Optical and Quantum Electronics*, 52, 293, 2020.
- [147] A. Kumar, S. Medhekar, “All optical NOR and NAND gates using four circular cavities created in 2D nonlinear photonic crystal,” *Optics & Laser Technology*, 123, 105910, 2020.

- [148] H. Mamnoon-Sofiani, S. Javahernia, “All optical NAND/NOR and majority gates using nonlinear photonic crystal ring resonator,” *Journal of Optical Communications*, pp. 1–10, 2021.
- [149] A. Safinezhad, *et al.*, High-performance and ultrafast configurable all-optical photonic crystal logic gates based on interference effects,” *Optical and Quantum Electronics*, 53, 259, 2021.
- [150] S. Swarnakar, *et al.*, “A Y-shaped photonic integrated device with XNOR/NAND/NOR for optical signal processing,” *Optical and Quantum Electronics*, 55, 801, 2023.
- [151] S. Foqani, H. Kaatuzan, M. Danaie, “Simulation and Design of a Wide-Band T-Shaped Photonic Crystal Splitter,” *Optica Applicata*, v. XL, n. 4, pp. 863–872, 2010.
- [152] V. Dmitriev, M. N. Kawakatsu, F. J. M. de Souza, “Compact three-port optical two-dimensional photonic crystal-based circulator of W-format,” *Optics Letters*, 37 (15), 3192, 2012.
- [153] G. Calo, V. Petruzzelli, “Wavelength routers for optical networks-on-chip using optimized photonic crystal ring resonators,” *IEEE Photonics J.*, 5(3), 7901011, 2013.
- [154] K. S. Novoselov, *et al.*, “Electric field effect in atomically thin carbon films,” *Science*, 306(5696), pp. 666–669, 2004.
- [155] R. Ji, L. Yang, L. Zhang, Y. Tian, J. Ding, H. Chen, Y. Lu, P. Zhou, W. Zhu, “Five-port optical router for photonic networks-on-chip,” *Optics Express*, 19 (21), 20258–20268, 2011.
- [156] S. Geerthana, T. Sridarshini, V. R. Balaji, *et al.*, “Ultra compact 2D-PhC based sharp bend splitters for terahertz applications,” *Optical and Quantum Electronics*, 55, 778, 2023.
- [157] F. Parandin, A. Sheykhan, N. Bagheri, “A novel design for an ultracompact optical majority gate based on a ring resonator on photonic crystal substrate,” *J. Comput. Electron.* 22, pp. 716–722, 2023.

Apêndices

2D-FDTD Electromagnetic Simulation of an Ultracompact All-Optical Logic Gate Based on 2D Photonic Crystal for Ultrafast Applications

Léo César P. de Almeida, Fabio B. de Sousa, Waldomiro G. Paschoal Jr. and Marcos B. C. Costa

Abstract—In this paper, the concept of photonic crystals (PhCs) is fundamental to designing and simulating an all-optical logic gate device. We proposed an all-optical switch composed of two-dimensional (2D) photonic crystal waveguides with a central photonic crystal ring resonator (PCRR). The new all-optical NAND logic gate device comprises two linear waveguides coupled to each other through a single compact PCRR. The plane wave expansion (PWE) and finite-difference time-domain (FDTD) methods are applied to simulate the properties of the system. The structure is implemented on the operational wavelength of 1700 nm on an air wafer of only $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$. Indeed, the simulation results show that the proposed all-optical NAND gate is a strong candidate for ultrafast photonic integrated circuits (PICs) for applications in optical communications, being advantageous with high transmitting power, with simple design, and without the use of optical amplifiers and nonlinear materials.

Index Terms—Photonic Crystals, Wave Propagation, Electromagnetic Simulation, All-Optical Logic Gates, Interference Effect, Performance Analysis.

I. INTRODUCTION

IN today's world, with diversified and rapidly growing technologies, innumerable advancements are needed in every field of research, especially in electronics and communications devices [1]. In this way, we are interested in the context of this advancement from electronics to world of optics.

Léo César P. de Almeida is with the Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), PA, Brasil., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal do Pará (UFPA), PA, Brasil. (e-mail: leocesarpa@ufpa.br; ORCID: 0000-0003-1535-5325).

Fabio B. de Sousa, and Marcos B. C. Costa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal do Pará, PA, Brasil. ORCID: 0000-0003-4170-5261; 0000-0003-1569-1249.

Waldomiro Paschoal Jr., Programa de Pós-Graduação em Física (PPGF), Universidade Federal do Pará (UFPA), PA, Brasil. ORCID: 0000-0002-2348-1244.

Digital Object Identifier: 10.14209/jcis.2024.4

First, all-optical logic gates (AOLGs) based on the characteristics of semiconductor optical amplifiers (SOAs) were reported [2], [3], [4]. However, there are some limitations to these methods, among which we can mention the high input power with a low power transmission, complex and expensive projects, in addition to the speed and size of the structures, causing them to be less used, making on-chip integration difficult [4].

Photonic crystals (PhCs) are periodic dielectric nanostructures [5] of diverse alternating layers of specific materials, with different refractive indices, which enable the manipulation and control of various forms of electromagnetic radiation (EMR).

Depending on the structural design, the refractive index varies in one, two, or three directions, resulting in 1D, 2D, or 3D photonic crystals [5]. The 2D photonic crystals are broadly used to design all-optical logic gates.

One of the emerging topics in electronics is increasing the speed of information transfer. For this reason, the design of digital optical devices has become an increasing research focus.

AOLGs based on 2D photonic crystals [5] with small sizes must be designed for high-speed optical integrated circuits, which is the gateway to the design of optical processors [6], [7], [8]. This work is made to design a NAND gate with a small size, and a simple structure that can be used in PICs.

The waveguides of a photonic crystal can have very sharp curves, with low losses in the structure, contributing to an increase of integration density of PICs components by several orders of magnitude [9]. Photonic crystals offer a wide range of applications in ultracompact all-optical integrated circuits with a high reduction in energy consumption. Several logic gates based on 2D photonic crystal platforms have been demonstrated [10].

Performance Analysis of an Optical System with Mach-Zehnder Interferometer and Semiconductor Optical Amplifier

Fábio S. de Araújo¹, Fabio B. de Sousa², Alan dos R. Silva¹, Simone C. da C. Tavares¹, Léo C. P. de Almeida¹, Fiterlinge M. de Sousa¹ and Marcos B. C. Costa¹

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Pará – Belém - Brazil

² Faculdade de Engenharia de Materiais – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará – Marabá - Brazil
e-mail:fabioarros@unifesspa.edu.br

1. Abstract

This paper presents the study of the performance of an optical system composed of a Mach-Zehnder interferometer, semiconductor optical amplifier and Bragg grating fiber. The system was simulated in OptiSystem software from OptiWave Corporation and analyzed in terms of bit error rate (BER) and Q factor for different bit sequences and input powers.

2. Introduction

Optical telecommunications systems play a key role in transmitting data at high speeds and over long distances. The Semiconductor Optical Amplifier (SOA) is an essential component in these systems, providing signal amplification and data processing. However, SOA is subject to non-linear effects such as cross-phase blending (XPM) and cross-gain modulation (XGM), which can compromise system performance [1]. In addition, the presence of a Bragg Grating in SOA can significantly influence its behavior, affecting the generation and amplification of optical signals [2].

Recent research has explored combining semiconductor optical amplifiers (SOA) with optical interferometers to create all-optical logic gates [3,4]. In [3], for example, the use of a Michelson interferometer with SOA and Fiber Bragg Grating (FBG) to implement an optical NOR logic gate at 10 Gb/s is investigated, aiming at high-speed processing and analysis of non-linear effects. In turn, in [4] fully optical "AND" logic gate schemes with three inputs are simulated and experimentally studied, in which the proposed gate exploits the non-linearities of the semiconductor optical amplifier Mach-Zehnder interferometer (SOA-MZI).

In this work, we present and analyze the performance of an optical communication system that implements the Mach-Zehnder interferometer (MZI) and a semiconductor optical amplifier (SOA) and Fiber Bragg Grating (FBG).

3. Materials and Methods

The system proposed in this work was simulated using the OptiSystem software and the Q-Factor and Bit Error Rate (BER) for the simulated system were analyzed.

A. Design of optical communication system with Mach-Zehnder interferometer

The optical communication system analyzed in this study is presented in Figure 1. The transmitter operates with two input signals, A and B, generated by the Bit Sequence Generator, with the Optical Gaussian Pulse Generator at frequencies of 1550 and 1550.1 nm, respectively, with input powers of 0.35 mW. Each signal is combined with a CW Laser pump at frequencies of 1330 and 1330.1 nm, with powers ranging from 0 dBm to 10 dBm, through 2x1 WDM multiplexers.

The combined signals enter the Mach-Zehnder interferometer, connected to the 1x2 Power Splitter, with an IIR optical filter at a frequency of 1550 nm between them, where the outputs have FBGs with frequencies equal to 1550 nm. The output signals from the FBGs are coupled back to the Co-Propagating Pump Coupler and passed through the Traveling Wave SOA, as shown in Fig.2. In the receiver, an optical IIR filter at 1550 nm is used to reject interference and noise, before being converted from optical to electrical form by the Optical Receiver, with a cutoff frequency of 0.55 times the Bit Rate in Hz, for a Gaussian Pulse Generator. The output signal is viewed through the Oscilloscope Visualizer and analyzed with the Eye Diagram Analyzed.

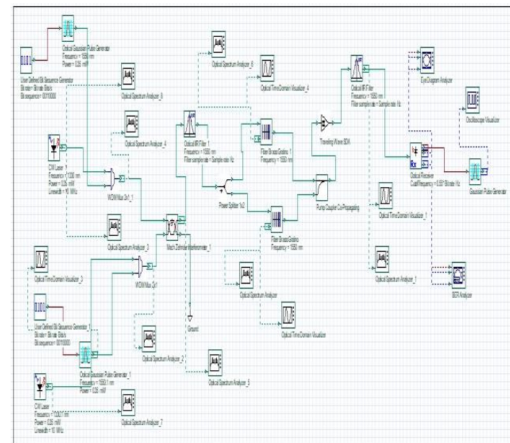


Fig.1. Overview of the proposed system.