



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PARA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA DA UFBA



**ANÁLISE DE PORTAS E CIRCUITOS LÓGICOS BASEADOS EM
CRISTAIS FOTÔNICOS**

PEDRO PAULO MATOS BARRETO

Autor

VITALY FÉLIX RODRIGUEZ-ESQUERRE

Orientador

SALVADOR

2020

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PARA PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UFBA

**ANÁLISE DE PORTAS E CIRCUITOS LÓGICOS BASEADOS EM
CRISTAIS FOTÔNICOS**

Autor: Pedro Paulo Matos Barreto

Orientador: Prof. Dr. Vitaly Félix Rodríguez Esquerre

Dissertação de mestrado elaborado por Pedro Paulo Matos Barreto, como parte das exigências do curso de mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia, sob a orientação do professor Dr. Vitaly Félix Rodríguez Esquerre.

SALVADOR

2020

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

MATOS BARRETO, PEDRO PAULO

ANÁLISE DE PORTAS E CIRCUITOS LÓGICOS BASEADAS EM CRISTAIS
FOTÔNICOS / PEDRO PAULO MATOS BARRETO. --
Salvador, 2020
93 f. : il

Orientador: Vitaly Felix Rodriguez Esquerre.
Dissertação (Mestrado - Engenharia Elétrica) --
Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica,
2019.

1. Portas lógicas totalmente ópticas. 2.
Interferômetro de Mach Zehnder. 3. Análise da
tolerância ao erro em hastes cilíndricas. 4. Análise da
tolerância ao erro em hastes elípticas. 5. Elaboração de
circuitos ópticos altamente integrados. I. Rodriguez
Esquerre, Vitaly Felix. II. Título.

Pedro Paulo Matos Barreto

"Análise de Portas e Circuitos Lógicos Baseados em Cristais Fotônicos"

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em: 28 de Janeiro de 2020.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Vitaly Félix Rodriguez Esquerre
Orientador/UFBA



Prof. Dr. Maicon Deivid Pereira
UFBA



Profª. Drª. Ana Julia Fernandes de Oliveira Barros
UNIVASF

Agradecimentos

A realização não só deste trabalho, mas de toda esta jornada, só foi possível graças a uma grande quantidade de familiares, amigos e diversas outras pessoas que se encontram envolvidas na minha vida e nos meus projetos, em que gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por ter me dado uma missão tão bonita, e colocado as pessoas certas na minha vida, pois sem elas eu não conseguiria cumprir os meus objetivos.

Ao professor e amigo, o Dr Vitaly Felix Rodriguez Esquerre pela orientação, apoio, amizade, oportunidade, paciência, incentivo e especialmente por ter acreditado em mim e no meu potencial. As minhas duas mães, a minha mãe e a minha tia Isália, pelo amor, carinho, incentivo, atenção e por acreditarem em mim e nas minhas escolhas. As minhas avós, Maria Matos e Maria Epifânia, por serem como uma segunda mãe para mim. Ao meu avô e meu verdadeiro pai, José Matos, pelo cuidado carinho e atenção, por mesmo depois do seu falecimento, continuar cuidando de mim. A minha tia Creusa, pelas orações e pelo carinho, a minha sobrinha Heloisa e o meu priminho João, por terem vindo alegrar a minha vida.

Ao Jiu - Jitsu por me fazer uma pessoa melhor a cada dia, me dando concentração, respeito e principalmente disciplina, em especial aos meus dois mestres Paulo Teixeira e Eduardo Castro, por além de me apresentarem ao Jiu - Jitsu, me deram uma segunda família, e aos nossos amigos/irmãos de treino Leonardo Provedel, Leonardo Taboada, Adriano Matos, Toti, Adriano Cardoso, Humberto Simon, Rodrigo Hage, Jorge Luis, Vinicius Menezes, Luis Sacchi, Marcos, Marcela, Tom, Bernardo, Enio, Zeba, João Paulo, João Maurílio.

As minhas professoras e grandes amigas Carla Freitas e Antônia Cruz, aos meus amigos e vizinhos Vitor e Talita Dourado, pela amizade e por me fazerem sentir como se fosse da sua família

Aos colegas do Laboratório de Telecomunicações da Escola Politécnica da UFBA, Túlio Freitas, Davi Franco Rêgo, Gabriel Couto, Icaro Sampaio, Karcus Day, Joaquim Lima, Emanuela Paranhos, Victor Mata, Juarez Caetano, Luana Vieira, Priscila Oliveira, Davi Araújo, Igor Souza, Miriele Paim, Rafael Andrade, Leonardo Jacobina, Ana Júlia e Anderson Dourado, os quais foram essenciais para manutenção do foco nas pesquisas.

Ao funcionário do departamento, Jaime Rodrigues, sempre tão competente e mostrando muita disposição para ajudar nos assuntos relacionados a pós-graduação e, a amiga Agatha Sampaio, pelo apoio aos colegas do curso.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pela concessão da bolsa de dedicação exclusiva e apoio financeiro.

"Somente se aproxima da perfeição quem a procura com constância, sabedoria e, sobretudo humildade."

Jigoro Kano

RESUMO

O presente trabalho trata da análise à tolerância aos erros, que ocorrem no processo de fabricação de diversas portas lógicas, como OR, XOR, XNOR, AND e NAND, que podem ser utilizadas para a confecção de circuitos lógicos. Os circuitos lógicos citados também foram analisados, de forma similar as portas lógicas, com uma análise aplicada a possíveis falhas, que ocorrem no processo de fabricação das portas lógicas, direcionada as possíveis alterações entre o projeto e o dispositivo final elaborado, em aspectos como alterações nas dimensões do raio e do espaçamento entre as hastes.

Os dispositivos analisados nesta dissertação são totalmente ópticos e, projetados com o uso de cristais fotônicos (PhC, *Photonic Crystals*), o Método utilizado nas simulações foi o Método dos Elementos Finitos (FEM, *Finite Element Method*) aplicado nas simulações, por meio do *software* COMSOL. A realização deste trabalho transcorreu por meio de diversas simulações e, a análise foi feita por meio da medição da intensidade do campo elétrico e, em seguida, foi realizada uma análise geral dos resultados.

O MMI (*Multi Mode Interference*, ou Interferômetro Multi Modo), MIX ou, Misturador, é um dispositivo capaz de realizar a soma ou cancelamento dos diferentes modos presentes no sinal eletromagnético. Foram feitas análises no posicionamento e nas dimensões do raio das hastes e até variou-se as suas proporções dos eixos x e y de forma isolada, de forma que as hastes assumam a forma de elipses.

Posteriormente, foi feita outra análise no mesmo dispositivo, na qual reduziu-se as dimensões das hastes em até 50%, nos intervalos de comprimento de onda de $1,261 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1,361 \mu\text{m}$ e $1,50 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1,62 \mu\text{m}$. A estrutura apresentada que possui um ou dois pares de anéis ressonantes, otimização das suas dimensões, que correspondeu a uma redução do seu número de hastes.

A estrutura que possui uma combinação de MMIs foi submetida a uma análise de tolerância ao erro presente nas variáveis do seu processo de fabricação, como o raio das hastes, em uma proporção de $\pm 10\%$ e, no índice de refração das hastes e do substrato, de forma isolada e simultânea, com isto, verificou-se que é possível variar o índice de refração das hastes, até uma certa faixa deste valor e, constatou-se que mudanças no índice do substrato, tem uma capacidade maior de alterar o nível lógico anteriormente apresentado.

Palavras Chave: Portas totalmente ópticas, XOR, XNOR, NAND, AND, OR e, NOT, cristais fotônicos, método dos elementos finitos, índice de refração.

ABSTRACT

The present work deals with the analysis of error tolerance, which occurs in the manufacturing process of several logic gates, such as OR, XOR, XNOR, AND and NAND, which can be used to make logic circuits. The logic circuits cited were also analyzed, similarly to logic gates, with an analysis applied to possible failures, which occur in the logic gates manufacturing process, targeting possible changes between the project and the final device developed, in aspects such as changes in the dimensions of the radius and the spacing between the rods.

The devices analyzed in this dissertation are completely optical and, designed with the use of photonic crystals (PhC, Photonic Crystals), the method used in the simulations was the Finite Element Method (FEM, Finite Element Method) applied in the simulations, through the software COMSOL. This work was carried out through several simulations, and the analysis was made by measuring the intensity of the electric field and, then, a general analysis of the results was performed.

The MMI (Multi Mode Interference, or MIX or Mixer) is a device capable of adding or canceling the different modes present in the electromagnetic signal. Analyzes were made on the positioning and dimensions of the radius of the rods and even their proportions of the x and y axes were varied in isolation, so that the rods assume the shape of ellipses.

Subsequently, another analysis was performed on the same device, in which the dimensions of the rods were reduced by up to 50%, in the wavelength intervals of $1,261 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1,361 \mu\text{m}$ and $1.50 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1.62 \mu\text{m}$. The structure presented that has one or two pairs of resonant rings, optimization of its dimensions, which corresponded to a reduction in the number of rods.

The structure that has a combination of MMIs was subjected to an error tolerance analysis present in the variables of its manufacturing process, such as the radius of the rods, in a proportion of $\pm 10\%$ and, in the refractive index of the rods and the substrate, in an isolated and simultaneous way, with this, it was found that it is possible to vary the index of refraction of the rods, up to a certain range of this value and, it was found that changes in the substrate index, have a greater capacity to change the level logic previously presented.

Keywords: All optical logic gates, XOR, XNOR, NAND, AND, OR and, NOT, photonic crystals, finite element method, refractive index.

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Dispositivo óptico elaborado utilizando um MMI.....	20
Figura 2.1 - Exemplos formas geométricas de cristais fotônicos (a) unidimensionais, (b) bidimensionais e (c) tridimensionais. As diferentes cores representam materiais com diferentes constantes dielétricas [9].....	26
Figura 2.2 - Exemplo de cristal fotônico bidimensional, em um arranjo de uma rede triangular de hastes de raio r , apresentado na Figura 2.2 (b).....	26
Figura 2.3 - Diagrama de bandas do dispositivo apresentado em [4], ilustrando a propagação das ondas eletromagnéticas, na direção de propagação $\Gamma\text{MK}\Gamma$, para os modos TM e TE.....	27
Figura 2.4 - (a) Curvas de dispersão para proteger as super-células de cristal óptico e de computação (inserção). (b) Curvas de dispersão para a guia de ondas w_2 e supercélula (inserção). (c) Curvas de dispersão para a guia de ondas- w_5 e a super-célula (inserção), [1].....	27
Figura 3.1 - Esquema do Guia de Onda W_2 e do Guia de Onda W_5 , do MZI apresentado em [1].....	30
Figura 3.2 - Distribuição espacial do campo na porta lógica representando a operação lógica XOR (Porta C).....	30
Figura 3.3 - Ilustração de todos os casos apresentados para o dispositivo implementado por meio do MMI.....	31
Figura 3.4 - (a) Representação da Porta AND, [2]. (b) Representação da Porta OR, [2].....	33
Figura 3.5 - Distribuição espacial do campo na porta lógica representando a operação lógica AND e OR [2].....	33
Figura 3.6 - Esquema do Guia de Onda W_1 e do Guia de Onda W_3 , do MZI apresentado em [3].....	34
Figura 3.7 - Representação do dispositivo elaborado por meio da combinação de MMIs.....	35
Figura 3.8 - (a) Distribuição espacial do campo quando a fase do sinal óptico nas portas A, B, C e D corresponde a 180° . (b) Distribuição espacial do campo quando a fase do sinal óptico nas portas A, B e C, corresponde a 180° , e na porta D corresponde a 0° , (c) Distribuição espacial do campo quando a fase do sinal óptico na porta A corresponde a 0° e, nas portas B, C e D corresponde a 180° . (d) Distribuição espacial do campo quando a fase do sinal óptico nas portas A e D corresponde a 0° e, nas portas B e C corresponde a 180° , [3].....	36
Figura 4.1 - Diagrama para definir as mudanças no posicionamento das hastes centrais, do dispositivo apresentado em [1].....	38
Figura 4.2.1 - Campo elétrico presente nas portas C e D, quando o comprimento de onda foi variado no intervalo de $1,55\ \mu\text{m}$ a $1,62\ \mu\text{m}$ dependendo da fase relativa dos campos nas portas C e D (a) fase relativa 0° (b) fase relativa 90° na porta e C e fase relativa 90° na porta D e (c) fase relativa 180°	39
Figura 4.2.2 - Campo elétrico presente nas portas C e D, quando o Comprimento de Onda foi variado no intervalo de $1,55\ \mu\text{m}$ a $1,62\ \mu\text{m}$ com fase relativa 0° , para uma diferença no posicionamento da haste central, indicado por meio da variável Δ_n ,	39
Figura 4.2.3 - Campo elétrico presente na porta C, quando o Comprimento de Onda foi variado no intervalo de $1,55\ \mu\text{m}$ a $1,62\ \mu\text{m}$ com fase relativa 90° , para uma diferença no posicionamento da haste central, indicado por meio da variável Δ_n , varia de $0,1a$ até $0,5a$ do valor da constante dielétrica da rede, a	40
Figura 4.2.4 - Campo elétrico presente na porta D, quando o Comprimento de Onda foi variado no intervalo de $1,55\ \mu\text{m}$ a $1,62\ \mu\text{m}$ com fase relativa 90° , para uma diferença no posicionamento da haste central, indicado por meio da variável Δ_n , varia de $0,1a$ até $0,5a$ do valor da constante dielétrica da rede, a	41
Figura 4.2.5 - Campo elétrico presente nas portas C e D, quando o Comprimento de Onda foi variado no intervalo de $1,55\ \mu\text{m}$ a $1,62\ \mu\text{m}$ com fase relativa 180° , para uma diferença no posicionamento da haste central, indicado por meio da variável Δ_n , varia de $0,1a$ até $0,5a$ do valor da constante dielétrica da rede, a	42
Figura 4.3.1 - Campo elétrico presente nas portas C e D quando o comprimento de onda foi variado no intervalo de $1,261\ \mu\text{m}$ a $1,361\ \mu\text{m}$ para uma diferença de fase relativa dos campos nas portas A e B de 0° , e o espaçamento da haste central do MMI, indicado por meio da variável Δ_n , varia de $0,1a$ até $0,5a$ do valor da constante dielétrica da rede, a	43
Figura 4.3.2 - Campo elétrico presente na porta C, quando o comprimento de onda foi variado no intervalo de $1,261\ \mu\text{m}$ a $1,361\ \mu\text{m}$ para uma diferença de fase relativa dos campos nas portas A e B é de 90° , e o espaçamento da haste central do MMI, indicado por meio da variável Δ_n , varia de $0,1a$ até $0,5a$ do valor da constante dielétrica da rede, a	44
Figura 4.3.3 - Campo elétrico presente na porta D quando o comprimento de onda foi variado no intervalo de $1,261\ \mu\text{m}$ a $1,361\ \mu\text{m}$ para uma diferença de fase relativa dos campos nas portas A e B é de 90° , e o espaçamento da haste central do MMI, indicado por meio da variável Δ_n varia de $0,1a$ até $0,5a$ do valor da constante dielétrica da rede, a	45
Figura 4.3.4 - Campo elétrico presente nas portas C e D quando o comprimento de onda foi variado no intervalo de $1,261\ \mu\text{m}$ a $1,361\ \mu\text{m}$ para uma diferença de fase relativa dos campos nas portas A e B é de	

180°, e o espaçamento da haste central, do MMI, indicado por meio da variável Δ_n varia de $0,1a$ até $0,5a$ do valor da constante dielétrica da rede, a	46
Figura 4.4.1 – Diagrama dos diferentes tamanhos das hastes, para uma variação do raio apenas no eixo x, rotacionadas de 0° a 75° para o dispositivo apresentado em [1].....	47
Figura 4.4.2 – Diagrama dos diferentes tamanhos das hastes, para uma variação do raio apenas no eixo y, rotacionadas de 0° a 75° para o dispositivo apresentado em [1].....	48
Figura 4.4.3 - Campo elétrico presente nas portas C e D, quando o comprimento de onda é 1,55 μm , variou-se o tamanho do raio apenas no eixo x até 100% do seu valor inicial, com uma variação da sua rotação, indicada por meio da variável <i>Rot</i> , de 15° a 75°, com fase relativa 0°.....	49
Figura 4.4.4 - Campo elétrico presente nas portas C e D, quando o comprimento de onda é 1,55 μm , variou-se o tamanho do raio apenas no eixo y até 100% do seu valor inicial, com uma variação da sua Rotação, indicada por meio da variável <i>Rot</i> , de 15° a 75°, com fase relativa 0°.....	50
Figura 4.4.5 - Campo elétrico presente na porta C, quando o comprimento de onda é 1,55 μm , variou-se o tamanho do raio apenas no eixo x até 100% do seu valor inicial, com uma variação da sua rotação, indicada por meio da variável <i>Rot</i> , de 15° a 75°, com fase relativa 90°.....	51
Figura 4.4.6 - Campo elétrico presente na porta D, quando o comprimento de onda é 1,55 μm , variado o tamanho do raio apenas no eixo x até 100% do seu valor inicial, com uma variação da sua rotação, indicada por meio da variável <i>Rot</i> , de 15° a 75° e com fase relativa 90°.....	52
Figura 4.4.7 - Campo elétrico presente na porta C, quando o comprimento de onda é 1,55 μm , variou-se o tamanho do raio apenas no eixo y até 100% do seu valor inicial, com uma variação da sua rotação, indicada por meio da variável <i>Rot</i> , de 15° a 75°, com fase relativa 90°.....	53
Figura 4.4.8 - Campo elétrico presente na porta D, quando o comprimento de onda é 1,55 μm , variou-se o tamanho do raio apenas no eixo y até 100% do seu valor inicial, com uma variação da sua rotação, indicada por meio da variável <i>Rot</i> , de 15° a 75° e com fase relativa 90°.....	54
Figura 4.4.9 - Campo elétrico presente nas portas C e D, quando o comprimento de onda é 1,55 μm , variou-se o tamanho do raio apenas no eixo x até 100% do seu valor inicial, com uma variação da sua rotação, indicada por meio da variável <i>Rot</i> , de 15° a 75°, com fase relativa 180°.....	54
Figura 4.4.10 - Campo elétrico presente nas portas C e D, quando o comprimento de onda é 1,55 μm , variou-se o tamanho do raio apenas no eixo y até 100% do seu valor inicial, com uma variação da sua rotação, indicada por meio da variável <i>Rot</i> , de 15° a 75°, com fase relativa 180°.....	55
Figura 4.5 - Campo elétrico presente nas portas C e D quando o comprimento de onda é de 1,55 μm , dependendo da fase relativa dos campos nas portas C e D (a) fase relativa 0°, (b) fase relativa 90° na porta e C, (c) fase relativa 90° na porta D e (d) fase relativa 180°, reduzindo o tamanho do raio das hastes em até 50%, sem rotação.....	56
Figura 5.1 - Porta AND implementadas com anéis ressonantes, e com dimensões otimizadas.....	58
Figura 5.2 - Porta OR implementadas com anéis ressonantes, e com dimensões otimizadas.....	60
Figura 5.3 - Distribuição espacial do campo na porta lógica representando a operação lógica AND e OR.....	61
Figura 6.3.1 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de 1,55 μm , dependendo da fase relativa dos campos nas portas A, B, C e D correspondem a 180°, reduziu-se e aumentou-se o tamanho do raio das hastes em até 10%.....	63
Figura 6.3.2 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de 1,55 μm , quando a fase relativa dos campos nas portas A, B, C e D correspondem a 180°, variou-se o índice de refração das hastes para 3,44, 3,55 e 3,66, respectivamente.....	64
Figura 6.3.3 - campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de 1,55 μm , quando a fase relativa dos campos nas portas A, B, C e D correspondem a 180°, variou-se o índice de refração do substrato para 1,44, 1,55 e 1,66.....	65
Figura 6.3.4- Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de 1,55 μm , quando a fase relativa dos campos nas portas A, B, C e D correspondem a 180°, variou-se o índice de refração das hastes para 3,44, 3,55 e 3,66 e do substrato para 1,44, 1,55 e 1,66.....	66
Figura 6.4.1 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de 1,55 μm , quando a fase relativa dos campos nas portas A e D correspondem a 0° e, nas portas B e C correspondem a 180°, reduziu-se e aumentou-se o tamanho do raio das hastes em até 10%.....	67
Figura 6.4.2 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de 1,55 μm , quando a fase relativa dos campos nas portas A e D correspondem a 0° e, nas portas B e C correspondem a 180°, variou-se o índice de refração das hastes para 3,44, 3,55 e 3,66.....	68
Figura 6.4.3 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de 1,55 μm , dependendo da fase relativa dos campos nas portas A e D correspondem a 0° e, nas portas B e C correspondem a 180°, variou-se o índice de refração do substrato para 1,44, 1,55 e 1,66.....	69

Figura 6.4.4 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de 1,55 μm , dependendo da fase relativa dos campos nas portas A e D correspondem a 0° e, nas portas B e C correspondem a 180° , variou-se o índice de refração das hastes para 3,44, 3,55 e 3,66 e do substrato para 1,44, 1,55 e 1,66.....	70
Figura 6.5.1 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de 1,55 μm , quando a fase relativa dos campos nas portas A corresponde a 0° e, nas portas B, C e D correspondem a 180° , reduziu-se e aumentou-se o tamanho do raio das hastes em até 10%.....	71
Figura 6.5.2 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de 1,55 μm , para a fase relativa dos campos na porta A corresponde a 0° e, nas portas B, C e D correspondem a 180° , variou-se o índice de refração das hastes para 3,44, 3,55 e 3,66.....	72
Figura 6.5.3 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de 1,55 μm , para a fase relativa dos campos na porta A corresponde a 0° e, nas portas B, C e D correspondem a 180° , variou-se o índice de refração do substrato para 1,44, 1,55 e 1,66.....	73
Figura 6.5.4 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de 1,55 μm , para a fase relativa dos campos na porta A corresponde a 0° e, nas portas B, C e D correspondem a 180° , variou-se o índice de refração das hastes para 3,44, 3,55 e 3,66 e do substrato para 1,44, 1,55 e 1,66.....	74
Figura 6.6.1- Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de 1,55 μm , quando a fase relativa dos campos nas portas A, B e C correspondem a 180° e, na porta D correspondem a 0° , reduziu-se e aumentou-se o tamanho do raio das hastes em até 10%.....	75
Figura 6.6.2 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de 1,55 μm , para a fase relativa dos campos nas portas A, B e C correspondem a 180° e, e na porta D corresponde a 0° , variou-se o índice de refração das hastes para 3,44, 3,55 e 3,66.....	76
Figura 6.6.3 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de 1,55 μm , para a fase relativa dos campos nas portas A, B e C correspondem a 180° e, e na porta D correspondem a 0° , variou-se o índice de refração do substrato para 1,44, 1,55 e 1,66.....	77
Figura 6.6.4 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de 1,55 μm , para a fase relativa dos campos nas portas A, B e C correspondem a 180° e, na porta D correspondem a 0° variou-se o índice de refração das hastes para 3,44, 3,55 e 3,66 e do substrato para 1,44, 1,55 e 1,66.....	78
Figura 7.1 - Distribuição espacial do campo, para quatro diferentes casos no circuito lógico projetado por meio da combinação de MMIs.....	81
Figura 7.2 - Distribuição espacial do campo, para quatro diferentes casos no circuito lógico projetado por meio da combinação de MMIs.....	82
Figura 7.3 - Distribuição espacial do campo, para quatro diferentes casos no circuito lógico projetado por meio da combinação de MMIs.....	83
Figura 7.4 - Distribuição espacial do campo, para quatro diferentes casos no circuito lógico projetado por meio da combinação de MMIs.....	84

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Estado da arte das diversas portas lógicas implementadas.....	24
Tabela 3.1 - A Tabela verdade para as portas XOR, XNOR, NAND e OR [1].....	31
Tabela 3.2 - A definição do valor lógico dos sinais nas portas (A e B), [1].....	32
Tabela 3.3 – Síntese dos quatro casos presentes no dispositivo apresentado em [3].....	34
Tabela 5.1- Tabela Verdade Para a Porta Lógica AND, indicada na Figura 4.6.1, com os resultados alcançados para a Transmissão na sua estrutura.....	58
Tabela 5.2: Tabela Verdade Para a Porta Lógica OR, indicada na Figura 4.6.2, com os resultados alcançados para a Transmissão na sua estrutura.....	59
Tabela 7.1: Verdade o dispositivo composto com uma combinação de MMIs.....	80

Lista de Abreviaturas e Siglas

FDTD - Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo

OOK - *ON OFF KEYING*

BPSK - *Binary Phase Shift Keying*

SiO₂ - Sílica, (Óxido de Silício)

Si – Silício

λ – Comprimento de onda

Rot – Rotação das hastes

a – Constante da rede

Δ_n - Variação no valor da constante da rede, a

Δ_0 – Sem variação no valor da constante da rede, a

MMI - *Multimode Interference*

TE – Modo Transversal Elétrico

TM – Modo Transversal Magnético

MZI – Interferômetro de Mach Zehnder

XOR - OR Exclusivo

XNOR - NOR Exclusivo

PWE – *Plane Wave Method*

nm - nanômetros

μm – micrometros

$E(t)$ - Campo elétrico

$H(t)$ - Campo Magnético

E_z - Campo elétrico na direção z

H_z - Campo Magnético na direção z

$E_{in\ 1}$ - Campo elétrico da entrada indicando o nível lógico 1

$E_{in\ 0}$ - Campo elétrico da entrada indicando o nível lógico 0

$E_{out\ 1}$ - Campo elétrico da saída do dispositivo indicando o nível lógico 1

$E_{out\ 0}$ - Campo elétrico da saída do dispositivo o nível lógico 0

FEM – *Finite Element Method*

$\phi_n(z)$ - Distribuição modal do campo, $E(t)$ e $H(t)$

$\Psi(x, y)$ - Campo eletromagnético total propagado no dispositivo

cn - Coeficiente de excitação

p - Número de modos presentes em $E(t)$ e $H(t)$

n denota a ordem de modos ($n = 0, 1, 2, \dots, p - 1$)

β_0 e β_n - Constantes propagação do modo fundamental e do enésimo modo

$e^{j(\beta_0 - \beta_n)x}$ - Modo do fator de fase

L_c – O mais curto comprimento de acoplamento pelo modo fundamental

N_H – Índice de refração das hastes

N_S – Índice de refração do substrato

$P_{out\ 1}$ – Potência na porta de saída para o nível lógico 1

$P_{out\ 0}$ – Potência na porta de saída para o nível lógico 0

T – Transmissão

r - Raio das hastes

r_x - Raio das hastes no eixo x

r_y - Raio das hastes no eixo y

Δr_x - Variação do raio das hastes no eixo x

Δr_y - Variação do raio das hastes no eixo y

Ref - Referência

MZI - Interferômetro de Mach Zehnder

ω - frequência angular

$j - \sqrt{-1}$

k_z – Vetor da onda eletromagnética na direção z

$H(r)$ – Vetor da onda eletromagnética polarizada para o modo TE e homogêneo na direção z

$E(r)$ – Vetor da onda eletromagnética polarizada para o modo TM e homogêneo na direção z

RC_1 - Relação de Contraste para o dispositivo apresentado em [1]

RC_2 - Relação de Contraste para o dispositivo apresentado em [2]

$|E_z|$ - Módulo do campo elétrico na porta da saída do dispositivo

$CL(s)$ – Circuito(s) lógico(s)

W1 – Guia de onda formado pela remoção de uma fileira de hastes

W2 – Guia de onda formado pela remoção de duas fileiras de hastes

W3 – Guia de onda formado pela remoção de três fileiras de hastes

W5 – Guia de onda formado pela remoção de cinco fileiras de hastes

MMI₁ – *Multi Mode Interference* acoplado nos sinais das portas de entrada A e B

MMI₂ – *Multi Mode Interference* acoplado nos sinais das portas de entrada C e D

MMI₃ – *Multi Mode Interference* acoplado nos sinais de saída do MMI₁ e do MMI₂

Sumário

1	INTRODUCAO.....	18
1.1	Motivação para a pesquisa.....	18
1.2	Revisão Literária.....	19
1.2.1	Portas lógicas totalmente ópticas baseadas em cristais fotônicos utilizando o MMI.....	20
1.2.2	Portas lógicas totalmente ópticas baseadas em cristais fotônicos utilizando o Anel Ressonante.....	21
1.3	Contribuições do trabalho.....	21
1.4	Organização do Trabalho.....	21
2	A TEORIA DOS CRISTAIS FOTÔNICOS.....	23
2.1	Introdução.....	23
2.2	Estado da arte deste assunto.....	23
2.3	Propriedades do cristal fotônico e diferentes tipos de Cristais.....	25
2.4	Diagrama de bandas fotônicas e os mapas de <i>gap</i>	27
3	PORTAS LÓGICAS TOTALMENTE ÓPTICAS.....	28
3.1	Introdução.....	28
3.2	Portas lógicas projetadas por do MMI.....	28
3.3	As portas lógicas projetadas por meio de anéis ressonantes.....	32
3.4	Circuitos lógicos projetadas por meio da combinação de MMIs.....	33
4	RESULTADOS ALCANÇADOS PARA A ANÁLISE DA TOLERÂNCIA AO ERRO NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PORTAS LÓGICAS TOTALMENTE ÓPTICAS.....	37
4.1	Introdução.....	37
4.2	A análise do MMI.....	38
4.2.1	Análise do comportamento do campo para um comprimento de onda no intervalo de $1,50 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1,62 \mu\text{m}$, com variação no posicionamento da haste central.....	38
4.2.1.1	A Diferença de Fase de 0°	39
4.2.1.2	A Diferença de Fase de 90°	40
4.2.1.3	A Diferença de Fase de 180°	41
4.3	Análise do comportamento do campo para um comprimento de onda no intervalo de $1,261 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1,361 \mu\text{m}$	43
4.3.1	A Diferença de Fase de 0°	43
4.3.2	A Diferença de Fase de 90°	44
4.3.2.1	Porta C.....	44
4.3.2.2	Porta D.....	45
4.3.3	A Diferença de Fase de 180°	46
4.4	Análise do comportamento do campo o comprimento de onda de $1,50 \mu\text{m}$, variou-se o tamanho das hastes, nas direções x e y, isoladamente.....	47
4.4.1	Análise do comportamento do campo para um comprimento de onda de $1,50 \mu\text{m}$, variando o raio apenas na direção x.....	48

4.4.1.1	A Diferença de Fase de 0°	48
4.4.1.1.1	Varição do raio no eixo x.....	48
4.4.1.1.2	Varição do raio no eixo y.....	49
4.4.2.1	A Diferença de Fase de 90°	50
4.4.2.1.1	Análise do campo na porta C para variação do raio no eixo x.....	50
4.4.2.1.2	Análise do campo na porta D para variação do raio no eixo x.....	51
4.4.2.1.3	Análise do campo na porta C para variação do raio no eixo y.....	52
4.4.2.1.4	Análise do campo na porta D para variação do raio no eixo y.....	53
4.4.3	A Diferença de Fase de 180°	54
4.4.3.1	Varição do raio no eixo x.....	54
4.4.3.2	Varição do raio no eixo y.....	55
4.5	Redução do raio das hastes.....	56
5	A REDUÇÃO NAS DIMENSÕES DO DISPOSITIVO IMPLEMENTADO COM ANEL RESSONANTE.....	57
5.1	Introdução.....	57
5.2	A Porta AND.....	57
5.3	A Porta OR.....	59
6	ANÁLISE DA TOLERÂNCIA AO ERRO NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO E OPERAÇÃO DO DISPOSITIVO IMPLEMENTADO COM A COMBINAÇÃO DE DOIS MMIS.....	62
6.1	Introdução.....	62
6.2	A análise da tolerância ao erro no processo de fabricação e operação do dispositivo implementado com a combinação de dois MMIs.....	62
6.3	Fase do sinal inserido nas portas A, B, C e D, correspondem a 180°	62
6.3.1	Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento e uma redução de 10% do valor raio.....	62
6.3.2	Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração das hastes.....	63
6.3.3	Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração do substrato.....	64
6.3.4	Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração das hastes e do substrato.....	65
6.4	Sinal com fase 0° nas portas A e D e sinal com fase 180° nas portas B e C.....	66
6.4.1	Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento e uma redução de 10% do valor raio.....	66
6.4.2	Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração das hastes.....	67
6.4.3	Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração do substrato.....	68
6.4.4	Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração das hastes e do substrato.....	69
6.5	Fase do sinal inserido na porta A corresponde 0° e, nas portas B, C e D correspondem a 180°	70

6.5.1	Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento e uma redução de 10% do valor raio.....	70
6.5.2	Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração das hastes.....	71
6.5.3	Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração do substrato.....	72
6.5.4	Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração das hastes e do substrato.....	73
6.6	Fase do sinal inserido nas portas A, B e C, correspondem a 180 ° e na porta D corresponde a 0°..	74
6.6.1	Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento e uma redução de 10% do valor raio.....	74
6.6.2	Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração das hastes.....	75
6.6.3	Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração do substrato.....	76
6.6.4	Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração das hastes e do substrato.....	77
7	O DISPOSITIVO IMPLEMENTADO COM A COMBINAÇÃO DE TRÊS MMIS QUE OPERA COMO UM CIRCUITO LÓGICO, ELABORADO POR MEIO DA COMBINAÇÃO DE DIFERENTES PORTAS LÓGICAS.....	79
7.1	Introdução.....	79
7.2	Os quatro diferentes casos para a distribuição espacial do campo eletromagnético no CL.....	79
7.2.1	A tabela verdade do circuito lógico composto por uma combinação de MMIs.....	79
7.2.2	A expressão Booleana para o circuito lógico.....	80
7.2.3	Os 16 diferentes casos para a distribuição espacial do campo eletromagnético no CL.....	81
7.3	Conclusões sobre CL lógicos ópticos.....	84
8	CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS.....	86
8.1	Conclusões.....	86
8.2	Trabalhos futuros.....	87
8.3	Publicações associadas ao trabalho.....	88
	REFERÊNCIAS.....	90

1 INTRODUÇÃO

As portas lógicas totalmente ópticas são implementadas usando materiais dielétricos ou materiais semicondutores, um dos materiais dielétricos mais utilizados no campo da óptica é a Sílica, SiO_2 (Óxido de Silício), que é uma das principais matérias primas para fabricação de fibras ópticas e cristais fotônicos e o semicondutor mais utilizado é o Silício, [4].

As portas lógicas totalmente ópticas são implementadas por meio de cristais fotônicos, anteriormente eram implementadas usando a arquitetura CMOS, neste trabalho foram simuladas em duas dimensões, inserindo dois sinais ou mais sinais em suas portas ou *gates* de entrada, de forma a apresentar um sinal de saída, capaz de indicar a presença do nível lógico alto ou baixo [1-5].

A principal motivação para realização deste trabalho veio de uma característica peculiar dos PhC, *Photonic Crystals*, serem fabricados por meio da inserção de defeitos em sua estrutura, a exemplo de orifícios preenchidos com ar [4] e [5] ou de hastes inseridas sobre uma camada de substrato, de material distinto ao das hastes, [1], [2] e [3], os quais podem ser considerados como um tipo de defeito inserido nestas estruturas, que trazem resultados benéficos ao projeto, como permitirem à transmissão do sinal óptico por meio de sua estrutura.

A estrutura apresentada em [1], possui um único MMI, o projeto apresentado em [3], possui três MMIs (*Multi Mode Interference*, ou Interferômetro Multi Modo), MIX ou, Misturador, é um dispositivo capaz de realizar a soma ou cancelamento dos diferentes modos presentes no sinal eletromagnético, para a maior parte das simulações utilizou-se o valor de λ de $1,55 \mu\text{m}$, pelo fato de estar localizada na região da Banda C, do espectro eletromagnético [6] e [7].

A estrutura apresentada em [2], utilizou pares de anéis ressonantes, um ou dois pares, para as portas OR e AND, respectivamente, assim como o MMI, os anéis ressonantes possuem a capacidade de realizar a soma ou cancelamento dos diferentes modos, presentes no sinal eletromagnético, por meio da inserção de uma diferença de fase, entre os dois sinais ópticos inseridos nas estruturas que utilizam estes anéis.

As novas geometrias de portas lógicas totalmente ópticas baseadas em cristais fotônicos bidimensionais, PhC 2D, apresentadas neste trabalho, servem como um bloco elementar, essencial para a construção de sistemas integrados, de processamento totalmente óptico, [8] e [9].

Os principais objetivos deste trabalho foram estudar as propriedades das diversas portas lógicas já desenvolvidas, visto que, todos os dispositivos citados nas referências deste trabalho, funcionam apenas para o modo TM ou TE [4].

Buscou-se fazer com que as portas lógicas venham apresentar dimensões ainda mais compactas, de forma a atender os requisitos de alta integração e reduzir os custos de fabricação destes dispositivos, além de possibilitar a elaboração de estruturas com hastes em novos formatos [4], [5] e [9].

Os objetivos específicos foram estudar a propagação e interação das ondas nas portas lógicas, a eficiência das portas lógicas, a influência dos parâmetros ópticos e geométricos, no processamento óptico, dentre eles a constante da rede, a , o sinal óptico inserido nas portas, λ , e a diferença de fase entre os sinais, $\Delta\phi$ [1].

1.1 Motivação para a pesquisa

Verifica-se que já é possível projetar, implementar e confeccionar portas lógicas totalmente ópticas, [1-5], para isto, são usados os cristais [10].

Observa-se também a existência de outros tipos de defeitos, como variações nas dimensões das camadas de substrato, do raio das hastes ou dos orifícios, nas estruturas e as

dimensões finais do dispositivo real confeccionado, ao final do processo de fabricação, que devem ser levados em consideração durante a realização do projeto, além do fato do mesmo possuir um certo limite, para os erros no processo de fabricação das portas lógicas totalmente ópticas, de forma a se manter em perfeito estado de funcionamento.

O tema abordado nesta dissertação tem vasta importância na atualidade, pois os dispositivos elaborados podem ser utilizados no processamento de sinais ópticos, na amostragem de sinais, no reconhecimento de cabeçalho, e até para fazer a comparação de diferentes sinais. Neste caso utiliza-se as portas XOR e XNOR, [1] e [9].

Existem situações que o objetivo é realizar a soma de dois sinais distintos, neste momento utiliza-se a porta OR [1], [2], [9] e [12], ou quando haja a intenção de inverter o nível lógico do sinal, para esta finalidade utiliza-se a porta NOT, [9] e [12].

As portas lógicas totalmente ópticas podem também ser utilizadas em instrumentação óptica, na integração em circuitos ópticos em larga escala, juntamente com circuitos eletrônicos e em muitas outras aplicações, [11] e [13].

O comprimento de uma porta lógica é medido do ponto de entrada dos guias de onda até a porta de saída, entre esses dois segmentos da porta deve haver o uso de algum dispositivo óptico para realizar processamento do sinal [9], [16] e [17], geralmente convertendo os dois sinais em um único sinal, que deve apresentar nível lógico alto ou baixo. As proporções dos dispositivos que serão integrados em larga escala, junto com dispositivos ópticos e, que apresentam comprimento da ordem de micrometros, estão diretamente relacionados aos elementos citados.

Assim, este trabalho se propôs a reduzir o comprimento total das portas lógicas totalmente ópticas [11], de modo a facilitar a questão o acoplamento em circuitos ópticos integrados em larga escala, devido a necessidade da conexão com outros dispositivos ópticos e até eletroeletrônicos [18].

1.2 Revisão Literária

As portas lógicas estudadas para realização deste trabalho, operam em dois subintervalos de comprimentos de onda, λ , que permitem transmitir o sinal eletromagnético com um baixo percentual de perdas. O primeiro subintervalo varia na faixa de 1,261 μm a 1,361 μm [1], e o segundo, variando de 1,50 μm a 1,62 μm , [1] e [4].

O uso destes subintervalos ocorreu pelo fato de que, além de estarem localizadas na região do infravermelho, em que é possível transmitir o sinal eletromagnético em dispositivos ópticos, como fibras ópticas e guias de onda, o segundo subintervalo ainda está localizado na região da Banda C, a qual apresenta os valores com um menor percentual de perdas, no sinal óptico transmitido e abriga também o valor de 1,55 μm , no qual o percentual de perdas no sinal eletromagnético é ainda menor [3].

O valor do comprimento de onda, citado no parágrafo anterior, apresenta percentuais de perdas ainda menores dentre os valores da Banda C, região do espectro eletromagnético muito utilizado no ramo de telecomunicações, logo foi utilizado exatamente este valor nas referências dos dispositivos apresentados em [2] e [3].

Os dispositivos ópticos estudados na neste trabalho, foram o MMI, região em que ocorre a soma ou o cancelamento dos diferentes modos, presentes no sinal eletromagnético, de forma a apresentar um único sinal na saída do dispositivo [1].

O outro dispositivo utilizado foi o anel ressonante hexagonal, [2] e [4], dispositivos que permitem realizarem a soma ou o cancelamento dos sinais ópticos, por meio da inserção de uma diferença de fases entre os sinais. Assim é possível apresentar um único sinal de saída, nestes

dispositivos, sendo ele com amplitude alta ou baixa, para desta forma indicar os respectivos níveis lógicos, zero ou um.

Foram implementadas com cristais com seção transversal circular [2] e [3] ou, elipses [1], com periodicidade em duas dimensões, 2D, por serem mais simples de serem analisados e sobretudo por ser um trabalho direcionado a uma análise teórica, com simulações computacionais.

1.2.1 Portas lógicas totalmente ópticas baseadas em cristais fotônicos utilizando o MMI

O interferômetro de Mach Zehnder, MZI, é um arranjo experimental óptico inventado por Ludwig Mach (1868-1949), filho do ilustre teórico Ernest Mach, e pelo físico suíço Ludwig Zehnder (1854-1949), por volta dos anos 1890. O interferômetro de Mach-Zehnder permite realizar interferência, difração e polarização com um feixe de luz coerente, em que se estuda o comportamento ondulatório da luz [14].

O MZI foi implementado utilizando o MMI, região presente no centro do MZI. Ela faz com que ocorra a soma ou o cancelamento dos diferentes modos, presentes no sinal óptico inserido no MZI, atua como um misturador dos dois sinais de entrada [6], com os parâmetros iniciais em que o raio das hastes, r , correspondem ao valor de 20% do valor da constante da rede, a , que corresponde ao valor de 431 nm [1].

As portas de entrada e saída do MZI foram elaboradas por meio de dois guias W2 de entrada e outros dois guias W2 de saída, implementados por meio da remoção de dois caminhos hastes de Silício, com raio de 86,2 nm, em uma camada de Sílica, materiais com índices de refração de 3,48 e 1,45, respectivamente, utilizou-se o modo transversal elétrico, TE, conforme apresentado na Figura 3.2 [1]. O MMI presente no MZI é confeccionado de forma semelhante, sendo que foram removidos cinco caminhos de hastes de Silício, conhecido como guia W5, conforme ilustrado na Figura 1.1 [1].

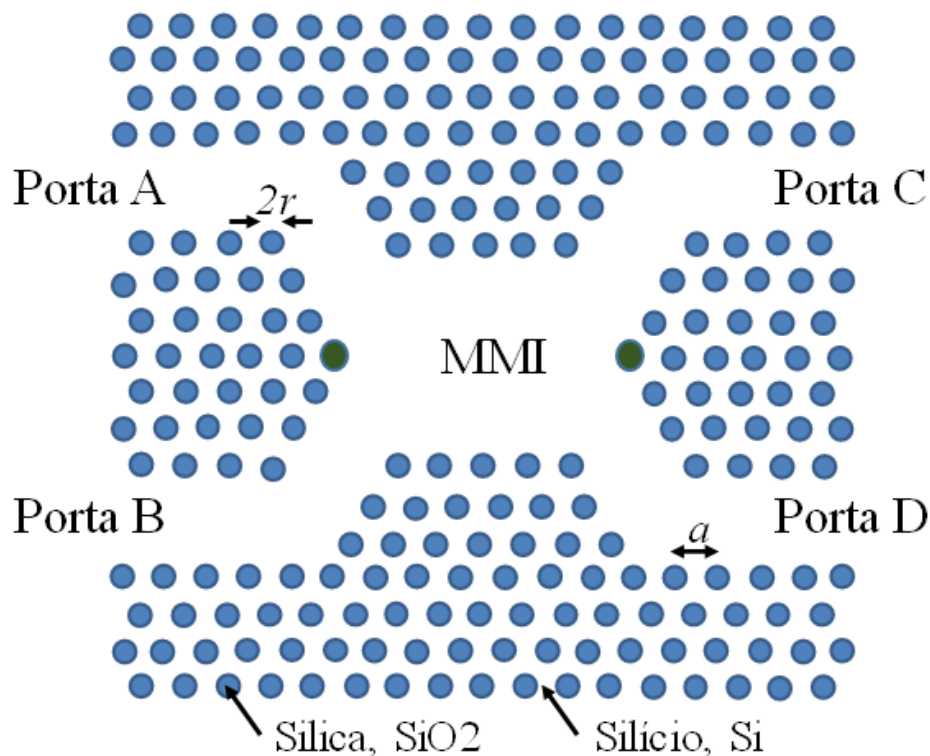


Figura 1.1 - Dispositivo óptico elaborado utilizando um MMI.

1.2.2 Portas lógicas totalmente ópticas baseadas em cristais fotônicos utilizando o anel ressonante

Os anéis ressonantes correspondem a um arranjo em forma de anel com formato circular ou hexagonal, capaz de inserir uma diferença de fase entre os sinais ópticos, desta forma ocorre a soma ou cancelamento, dos diferentes modos presentes no sinal óptico inserido na estrutura [2] e [4].

1.3 Contribuições do trabalho

O dispositivo que utiliza apenas um MMI foi submetido a uma redução no valor do seu raio inicial, de carácter uniforme para os eixos x e y , para uma diferença de fase entre as portas A e B de 0° , 90° e 180° , para os três casos citados manteve a mesma indicação de valor lógico para os respectivos níveis lógicos, alto e baixo.

O dispositivo que opera por meio de um ou dois pares e anéis ressonantes quando foi submetido a uma redução no seu número de hastes, constatou-se ser possível reduzir o número de hastes de sua abscissa e de sua ordenada, pois manteve-se os resultados apresentados em sua referência para a relação de contraste e para a razão entre os níveis lógicos alto e baixo.

Para o dispositivo que utiliza combinações de MMIs, o índice de refração que foi aplicado nas hastes, foi possível detectar a presença do nível lógico alto, apesar de haver uma redução significativa no valor de E_z , posteriormente, não foi possível detectar a presença do nível lógico alto.

O valor do índice de refração do substrato, quando alterado neste trabalho constatou-se uma queda bem significativa no valor de $|E_z|$ para os três casos em que foi detectado a presença o nível lógico alto, fato que prova não ser possível variar o índice de refração do substrato, passa a não mais ser possível indicar a presença do nível lógico alto.

Para este mesmo dispositivo que apresentou a Expressão Booleana, $F = A \text{ XNOR } B + C \text{ XNOR } D$ e a análise dos resultados apresentados no Capítulo 7, Seção 7.2, permitiram encontrar uma expressão Booleana para os níveis lógicos representados na Tabela 7.1, $F = (A' \text{ AND } B') \text{ OR } (A \text{ AND } B \text{ AND } C) \text{ OR } ((A \text{ OR } B) \text{ AND } ((C \text{ AND } D) \text{ OR } (C' \text{ AND } D)))$

1.4 Organização do Trabalho

O trabalho aqui apresentado está dividido em seis capítulos. O presente capítulo contém a introdução, motivação, revisão literária, justificativa e a organização deste trabalho.

O Capítulo 2 retrata à teoria de PhC, na qual abordou-se aspectos como as estruturas unidimensional e bidimensional, o estado da arte deste assunto, a representação das estruturas fotônicas, uma síntese a respeito do intervalos de Banda Fotônica ou *Photonic Band Gap*, PBG, das estruturas abordadas neste trabalho e os dispositivos ópticos utilizados, como o MMI [1] e [3], para isto, retratou-se os diversos tópicos relevantes para descrição do seu funcionamento, desde a sua estrutura, até as fórmulas matemáticas usadas para o cálculo das grandezas físicas, que estão relacionadas com a sua operação.

O Capítulo 3 apresenta os dispositivos ópticos que foram abordados para a realização deste trabalho, com base nas referências [1] e [3], os quais utilizou-se o MMI e, [2], que utiliza anéis ressonantes.

Nos Capítulos 4 e 5 estão apresentados os resultados que foram obtidos, por meio de simulações, realizadas nas estruturas abordadas neste trabalho, para isto, foram apresentadas ilustrações dos gráficos do comportamento do campo elétrico e, as situações em que é viável

realizar alterações nos parâmetros iniciais das estruturas, a exemplo do raio, formato, espaçamento das hastes [1], do número de hastes da estrutura [2] e do índice de refração [3].

O Capítulo 6 finaliza este trabalho, nele realizou-se uma conclusão, a partir de todas as informações que foram apresentadas ao longo deste trabalho, abordou-se temas como resultados obtidos, contribuições deste trabalho, trabalhos futuros.

2 A TEORIA DOS CRISTAIS FOTÔNICOS

2.1 Introdução

Os cristais fotônicos são uma estrutura muito utilizada, na atualidade, devido a suas diversas aplicações, sobretudo no ramo das telecomunicações.

As perturbações inseridas na estrutura do PhC, como a inserção de orifícios ou de hastes de outro material na camada do substrato, conforme apresentado nas Figuras 2.1 e 2.2, que trazem ilustrações dos PhC analisados nesta dissertação.

As perturbações têm a finalidade de inserir um espalhamento ou confinamento do sinal óptico no dispositivo, as quais obedecem às Quatro Equações de Maxwell. O sinal eletromagnético se propaga por meio do seu espalhamento, entre os múltiplos átomos da estrutura, os quais apresentam distribuição periódica ao longo do cristal fotônico [19].

As ondas eletromagnéticas inseridas sobre os PhC são capazes de interferir construtivamente ou destrutivamente, entre si, seguindo a direção de propagação no cristal, $\Gamma\text{MK}\Gamma$, de acordo com as Zonas de Brillouin [20], conforme apresentado na Figura 2.4 [4].

O resultado deste processo de interferência entre as ondas eletromagnéticas sobre o cristal resulta em uma onda estacionária, a qual não pode se propagar no cristal e como consequência, as bandas são separadas por intervalos, denominados PBG, que correspondem justamente a intervalos presentes no mapa de *Gap*, no qual, os diferentes modos do sinal eletromagnético, TM e TE, não conseguem se propagar na estrutura do PhC, conforme ilustrado na Figura 2.4 [4].

Os casos de estruturas com propagações em três dimensões, que não apresentam modos de propagação em nenhuma direção, para certos intervalos de frequência, estes casos são denominados PBG e, pode-se citar como exemplo, as esferas dielétricas com alto índice de refração [21].

2.2 Estado da arte deste assunto

A Tabela 2.1 apresenta um breve resumo dos principais trabalhos já realizados, por meio de um quadro comparativo, entre as principais variáveis envolvidas nos diversos trabalhos referentes a este tema. Após a pesquisa bibliográfica pode-se pontuar que, na maior parte dos trabalhos apresentados, o raio das hastes possui valores da ordem de centenas de nanômetros, com exceção da referência [1], no qual o das hastes é inferior a 100 nm.

Constatou-se que existem três dispositivos capazes de realizar a soma ou o cancelamento dos diferentes sinais ópticos, que possuem a configuração dos seus guias de onda em forma de “Y” [5], [8], [15], [39], ou de “T” [14], citadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Estado da arte das diversas portas lógicas implementadas.

Ref	Ano	Dispositivo Óptico	r	Modos	$E_{out\ 1}$	$E_{out\ 0}$	λ	a	Dimensões	Portas implementadas
[1]	2013	MZI	86,2 nm	TM	90% - 100%	0% - 30%	(1,261 μm - 1,361 μm) e (1,50 μm - 1,62 μm)	0,431 μm	6,9 μm x 6,7 μm	XOR, XNOR, NAND e OR
[2]	2014	Anel Ressonante	0,1 μm	TM e TE	70% para OR e 80% para AND	0% para OR e 40% para AND	1,216 μm - 1,941 μm	0,54 μm	13 μm x 13 μm	AND e OR
[3]	2014	Dois MZIs combinados	0,22 μm	TM	150% - 220%	35%	1,55 μm	0,55 μm	14,025 μm x 22,39 μm	OR e NAND
[4]	2013	Anel Ressonante Hexagonal	0,245 μm	TM e TE	95% - 100%	0% - 33%	1,30 μm - 1,55 μm	0,7 μm	9,1 μm x 14,7 μm	AND
[5]	2013	Guias de onda em forma de Y	0,5 μm	TM	158%	0% - 39,5%	1,166 μm - 1,926 μm	1,125 μm	16,875 μm x 16,875 μm	AND
[23]	2012	Guias de onda em forma de Y	0,2475 μm	TM	75% - 91%	0,58% - 0,67%	1,55 μm	0,875 μm	23,625 μm x 19,70 μm	OR, XOR, NOT, XNOR, e NAND
[16]	2013	Anel Ressonante e Guia em forma de T	0,1323 μm	TM	78% - 98%	2%	1,4318 μm - 1,9688 μm	0,63 μm	18 μm x 11 μm	NOR
[9]	2015	Guias de onda em forma de Y	0,1056 μm	TM	44,97% - 46,638%	0% - 17,194%	1,291 μm - 1,715 μm	0,352 μm	5,28 μm x 5,28 μm	AND, OR, XOR, NOT, NAND, NOR
[12]	2015	Técnica que forma rachaduras ao longo da circunferência	0,115 μm	TE	150% - 200%	0%	1,55 μm	0,575 μm	8,625 μm x 8,625 μm	AND, OR, NOT e NOR
[24]	2013	Guias de onda em forma de Y	0,144 μm	TM	55%	0%	1,44 μm	0,48	9,6 μm x 4,98 μm	Ainda não implementa portas lógicas

2.3 Propriedades do cristal fotônicos e diferentes tipos de cristais

Os cristais fotônicos são estruturas, que obrigatoriamente apresentam periodicidade dos materiais que compõem seus corpos e, conseqüentemente, no índice de refração, em uma, duas ou até para as três dimensões e, são denominados cristais fotônicos com simetria uni, bi ou tridimensional, ou PhC 1D, PhC 2D e PhC 3D, respectivamente [22].

Os PhC podem apresentar a propriedade denominada Intervalo de Banda Fotônica (*Photonic Band Gap* - PBG), a qual se refere a uma região presente no gráfico de propagação do sinal eletromagnético no PhC, na qual o sinal eletromagnético não se propaga, conforme a onda eletromagnética atravessa de forma perpendicular o cristal fotônico 1D, 2D ou 3D, por meio de suas múltiplas camadas periódicas, conforme apresentado na Figura 2.1 [22].

O cristal fotônico bidimensional é uma estrutura que apresenta periodicidade em duas direções, sendo homogêneo na terceira, conforme ilustrado na Figura 2.1 (b) [22]. Como consequência, estes cristais apresentam PBG apenas para luz incidente no plano x - y e, depende não só da geometria da estrutura, mas também da polarização da luz e, da constante da rede, a , variável que corresponde ao espaçamento entre o centro das hastes do PhC 2D apresentado na Figura 2.1 (b).

Os materiais que apresentam defeitos periódicos em sua estrutura, como os PhC, usados na implementação dos diversos dispositivos ópticos desta dissertação, apresentam curvas de dispersão para os diferentes modos, das ondas eletromagnéticas inseridas nos mesmos, por meio de um sinal óptico, para estes modos podem ocorrer à propagação ou o confinamento dos fótons presentes neste sinal, para os diferentes valores de frequência normalizada, $\frac{a}{\lambda}$, na qual o dispositivo está operando, desta forma, é possível utilizar estes dispositivos para transmitir um determinado sinal por meio dos PhC.

Os valores de frequência normalizada que a onda eletromagnética não apresenta solução são chamados de PBG, eles correspondem a uma faixa de valores para um determinado modo, em que não ocorre a propagação da onda eletromagnética e existem valores de frequência normalizada, que não ocorre propagação de nenhum modo da onda eletromagnética.

Apenas por meio da união de todas estas variáveis do projeto do PhC 2D foi possível obter o domínio sobre a região do PBG completo destes cristais, fundamental para manter o perfeito estado de funcionamento dos PhC, nas etapas de transmissão ou confinamento do sinal eletromagnético, por meio de sua estrutura.

O cristal fotônico tridimensional é a estrutura que mais se assemelha a um cristal real, pois apresenta periodicidade nas três dimensões, conforme apresentado na Figura 2.1 (c). Como resultado, os PhC 3D podem apresentar PBG em quaisquer direções da incidência da luz na estrutura destes cristais, sendo denominado PBG completo, pois há uma completa lacuna no gráfico do sinal eletromagnético, conforme ilustrado na Figura 1.1 (a) [22].

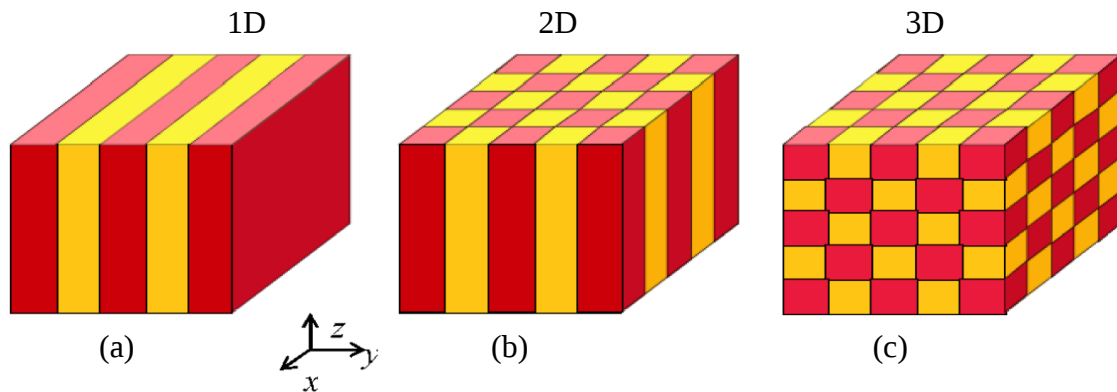


Figura 2.1 - Exemplos formas geométricas de cristais fotônicos (a) unidimensionais, (b) bidimensionais e (c) tridimensionais. As diferentes cores representam materiais com diferentes constantes dielétricas [20].

Uma boa explicação referente ao princípio físico dos PBG foi proposta por Fabiola A. Quiñonez, em sua dissertação de mestrado “Cristais fotônicos 2 D: projeto e fabricação” [22], da qual foi extraído os seguintes trechos:

“O surgimento do PBG pode ser explicado da seguinte forma: a luz atravessando o material será refratada e parcialmente refletida nas interfaces entre os diferentes materiais (ou entre o material e o ar). O padrão complexo da superposição das ondas irá reforçar ou cancelar uma a outra de acordo com o comprimento de onda da luz, sua direção de propagação no cristal, o índice de refração dos materiais e o tamanho e arranjo das estruturas”.

“As simetrias do cristal podem ser utilizadas para caracterizar seus modos eletromagnéticos. Pelo fato de o sistema ser homogêneo na direção z , os modos devem oscilar nesta direção sem restrições no vetor de onda k_z . Se $k_z = 0$, de forma que a onda se propague estritamente no plano x - y , o sistema é invariante por reflexão no plano x - y , o que nos permite classificar os modos separando-os em duas polarizações distintas: TE para a qual os modos têm $H(r)$ normal ao plano, $\mathbf{H} = H(r) \cdot \hat{z}$, e $\mathbf{E}$ no plano, $E(r) \cdot \hat{z} = 0$; e TM, para a qual os modos têm justamente o reverso: $\mathbf{E} = E(r) \cdot \hat{z}$ e $\mathbf{H}$ no plano $H(r) \cdot \hat{z} = 0$ ” [22].

“Os diagramas de bandas para os modos TE e TM podem ser completamente diferentes, pode existir PBG para uma das polarizações e para a outra não, também pode ocorrer PBG para ambas as polarizações simultaneamente, dependendo do tipo de estrutura analisada” [22].

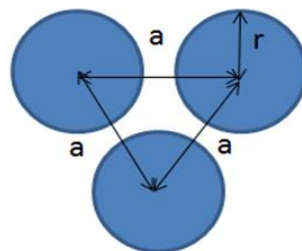


Figura 2.2 – Exemplo de um arranjo de hastes em um cristal fotônico bidimensional, de uma rede triangular de hastes de raio r , apresentado na Figura 2.1 (b).

2.4 Diagrama de bandas fotônicas e os mapas de *gap*

O conjunto de diagramas de bandas fotônicas permite montar um mapa de *gap* de uma estrutura, conforme apresentado na Figura 2.4 [4] e Figura 2.5 [3], nelas é possível visualizar diretamente a largura e a posição do PBG Completo, em função da frequência normalizada da estrutura, para um dado índice de refração do material, por meio dos diferentes modos. Na Figura 2.5 (b) e (c) é possível detectar a presença dos diferentes modos, para os guias W2 e W5 [1].

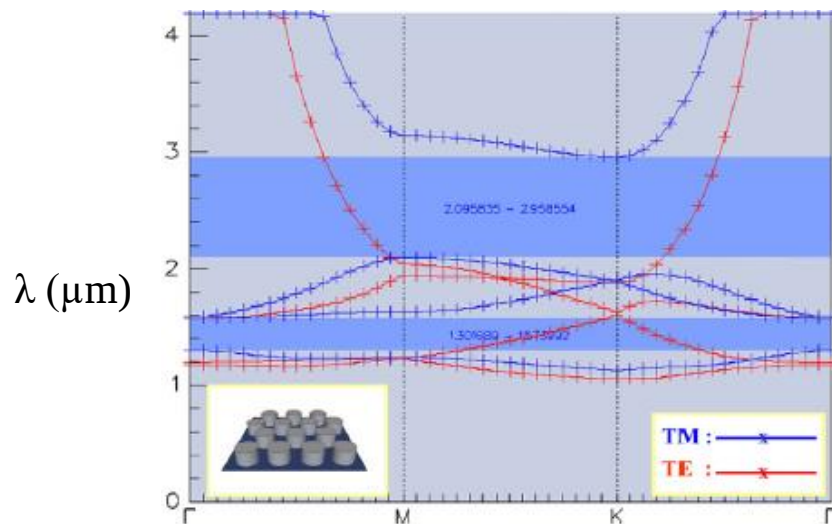


Figura 2.3 - Diagrama de bandas do dispositivo apresentado em [4], ilustrando a propagação das ondas eletromagnéticas, na direção de propagação $\Gamma MK\Gamma$, para os modos TM e TE.

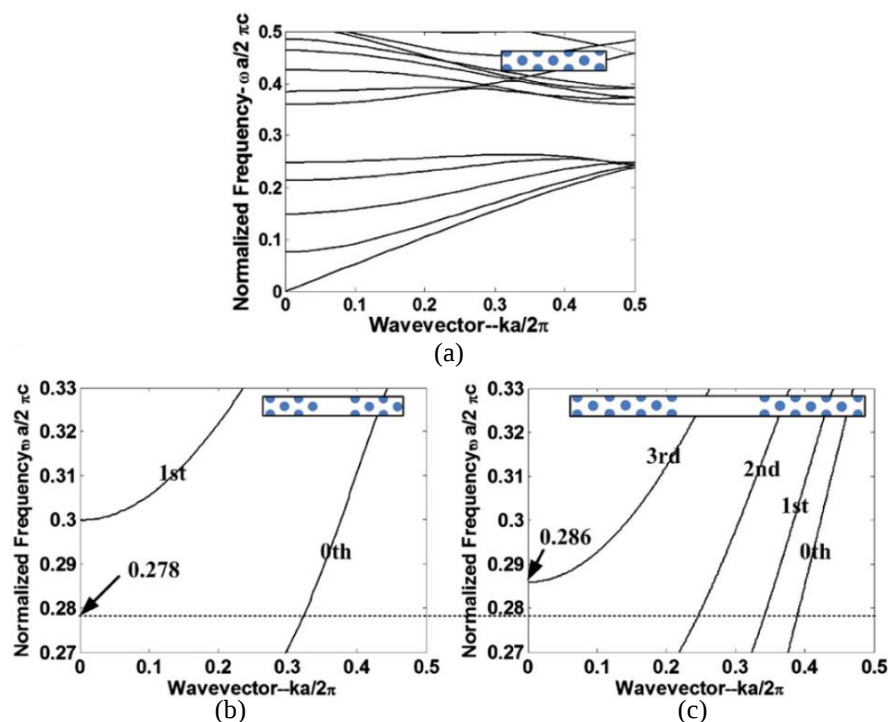


Figura2.4 - (a) Curvas de dispersão para as super-células de cristal óptico e a super-célula computacional (inserção). (b) Curvas de dispersão para a guia de ondas W2 e supercélula (inserção). (c) Curvas de dispersão para a guia de ondas W5 e a super-célula (inserção), [1].

3 AS PORTAS LÓGICAS TOTALMENTE ÓPTICAS

3.1 Introdução

Este capítulo aborda as diversas portas lógicas confeccionadas por meio de diferentes dispositivos ópticos, e que estão divididas em três grupos: as portas implementadas por meio de um MMI – [1], por meio do uso de anéis ressonantes – [2], e por meio da junção de três MMIs – [3]. Para isto foi abordado a teoria, materiais, parâmetros e variáveis utilizadas pelas mesmas portas lógicas totalmente ópticas.

3.2 Portas lógicas projetadas por meio do MMI

A estrutura de uma porta lógica óptica implementada por meio de um MMI, apresentada na Figura 3.1, a qual possui como portas de entrada: A e B, e de saída: C e D. As portas lógicas são estruturas que permitem realizar operações lógicas, dentre as quais pode-se citar: OR, AND, NOT, XOR, XNOR, NAND, NOR [26], com os diferentes sinais lógicos.

No dispositivo apresentado em [1], estas portas lógicas foram implementadas com o uso de um MZI – dispositivo que realiza as operações lógicas com os diferentes sinais inseridos sobre sua estrutura, os PhC – estruturas que realizam a reflexão e refração do sinal óptico [31] e, os guias de onda - permitem a transmissão das ondas eletromagnéticas por meio de sua estrutura, nesta estrutura são usados os guias de onda W2 e W5 [1].

O dispositivo citado são: XOR, XNOR, NAND e OR. A porta é implementada com o uso de dois guias de onda W2, e um MMI, à Relação de Contraste, CR , a qual calcula, em escala logarítmica, a relação entre a amplitude entre do sinal do campo elétrico, na saída do dispositivo, na presença do nível lógico alto, $E_{out\ 1}$, e o sinal do campo elétrico que indica a presença do nível lógico baixo, $E_{out\ 0}$. Para estas portas são 28,6dB, 28,6dB, 25dB e 26,6dB, respectivamente [1].

Usou-se a técnica *Binary Phase Shifting Keying*, BPSK, pois permite apresentar um único sinal na saída, após receber dois sinais de entrada, os quais se caracterizam por possuírem uma amplitude, referente a o campo elétrico ou magnético, calculada por meio do módulo dos vetores dos seus relativos campos, $|E(t)|$ e $|H(t)|$, respectivamente e, estes vetores oscilam com fator de fase $e^{j\omega t}$, em que j indica a $\sqrt{-1}$, ω indica a frequência angular e, t o tempo [1]. As ondas eletromagnéticas devem obedecer às Equações de Maxwell e, este dispositivo opera na faixa de frequência de Tera Hertz [1] e [19].

O valor do λ escolhido para ser trabalhado é um $1,55\mu\text{m}$, a frequência normalizada, dada pela relação $\frac{a}{\lambda}$ é $0,2622 \leq \frac{a}{\lambda} \leq 0,3596$, foi escolhido pra as simulações 0,278, pois quando substituído nesta equação, para o valor de a , correspondente a 431 nm, é obtido o valor de $1,55\mu\text{m}$ [1].

O funcionamento desta porta ocorre quando os dois sinais são inseridos no dispositivo, pelos guias de onda, ao mesmo tempo, com a mesma fase ou fases distintas, os sinais irão se cancelar na direção z e ficam na mesma direção no eixo x – são

superpostos nesta direção, este processo gera também o efeito de autoimagem no guia W5.

O efeito de autoimagem é ocasionado por meio da produção de pulsos ópticos de saída, que permanecem quase inalterados na propagação dispersiva, gerando uma imagem simples ou dupla ao longo da direção x de forma alternada, havendo um cancelamento de alguns componentes devido a oposição de fases e ao casamento dos modos de 1ª e 2ª ordem, indicados na Figura 2.5 (a) [1] e [14].

Para encontrar as funções lógicas é preciso encontrar a posição apropriada para que seja posicionado o MMI, para haver a superposição correta das componentes, de forma que o sinal resultante venha a emergir apenas em uma direção do MMI e, do interferômetro, desta forma, a porta de saída será colocada nesta posição, de modo a se obter função lógica desejada [1] e [14].

O projeto apropriado do comprimento do guia W5 foi feito baseado na análise da distribuição do campo, o qual será abordado nesta dissertação por meio da variável $\Psi(x, y)$, que representa o campo eletromagnético total propagado no dispositivo, desde os guias de entrada, usados nas portas A e B, até os guias de saída, portas C e D, conforme ilustrado na Figura 3.2.

O campo elétrico deve ser confinado na região de guiamento para não excitar outros modos, conforme ilustrado na Figura 2.5 (a) e (b), na qual é possível identificar os diferentes modos presentes nos guias W2 e W5, respectivamente [1].

A equação 3.1, que representa o campo eletromagnético total propagado no dispositivo, apresenta as variáveis: $\varphi_n(z)$, que corresponde à distribuição modal do campo, cn é o coeficiente de excitação, p é o número de modos e, o subscrito n denota a ordem de modos ($n = 0, 1, 2, \dots, p - 1$), $e^{[j(\beta_0 - \beta_n)x]}$ é modo do fator de fase, no qual β_0 e β_n são as constantes propagação do modo fundamental e do n -ésimo modo, o coeficiente de excitação, cn , pode ser estimado usando sobreposição de integrais com base nas relações ortogonalidade-campo, de acordo com a equação 3.2, em duas dimensões.

$$\Psi(x, y) = \sum_{n=0}^{p-1} [cn\varphi_n(z)e^{[j(\beta_0 - \beta_n)x]}] \quad (3.1)$$

$$\frac{\int (\Psi(x, y)) \cdot (\varphi_n(z)) \cdot dz}{\int ((\varphi_n^2(z))) \cdot dz} = Cn \quad (3.2)$$

A diferença de fase ($\Delta\varphi$) = ($\varphi_1 - \varphi_2$), para $\varphi_1 = 90^\circ$ e $\varphi_2 = -90^\circ$ ou para $\varphi_1 = 0^\circ$ e $\varphi_2 = 180^\circ$) em que φ_1 e φ_2 são as fases dos dois sinais de entrada nas portas A e B, que apresentam a mesma magnitude (intensidade), λ e polarização, descrito por [1].

O L_c representa o mais curto comprimento de onda de acoplamento pelo modo fundamental e é calculado seguindo a equação 3.3, na qual, a Relação de Contraste dos sinais é dado pela equação 3.4, a presença no nível lógico alto é detectada quando $|E_z| \geq 1,0 \frac{V}{m}$ e, a presença do nível lógico baixo é detectada quando $|E_z| \leq 1,0 \frac{V}{m}$, na porta C de saída do dispositivo.

$$\frac{\pi}{(\beta_0 - \beta_n)} = Lc \quad (3.3)$$

$$RC_I = 10 \log_{10} \frac{|E_{out\ 1}|}{|E_{out\ 0}|} \quad (3.4)$$

As combinações lógicas entre os sinais de entrada apresentadas na Tabela 3.1 e, obedecem as configurações de fases para as portas de entrada, A e B, da Tabela 3.2 e, estão retratadas os diferentes estados dos sinais, a ser definido pelas diferentes fases dos mesmos, a escolha destas fases foi feita por meio de simulações, buscando por meio das três variações de fases, 0° , 90° e 180° , entre os sinais inseridos nas portas de entrada A e B, de modo a ser possível representar as diversas portas lógicas, para o dispositivo óptico citado, que possui dimensões de $6,9\ \mu\text{m} \times 6,7\ \mu\text{m}$, descrito por [1].

A Figura 3.4 ilustra o comportamento deste dispositivo, para as entradas e saídas, denominada distribuição espacial do campo, similar a uma tabela verdade para as portas lógicas que este dispositivo é capaz de representar: XOR, XNOR, NAND e OR.

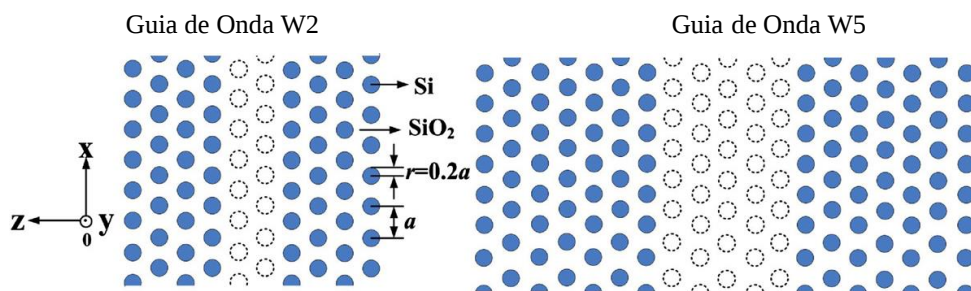


Figura 3.1 - Esquema do Guia de Onda W2 e do Guia de Onda W5, do MZI apresentado em [1].

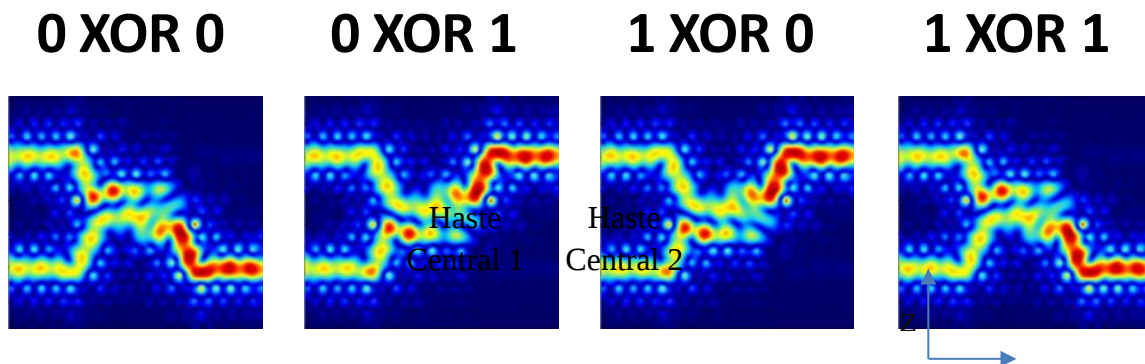


Figura 3.2 - Distribuição espacial do campo na porta lógica representando a operação lógica XOR (Porta C) [23].

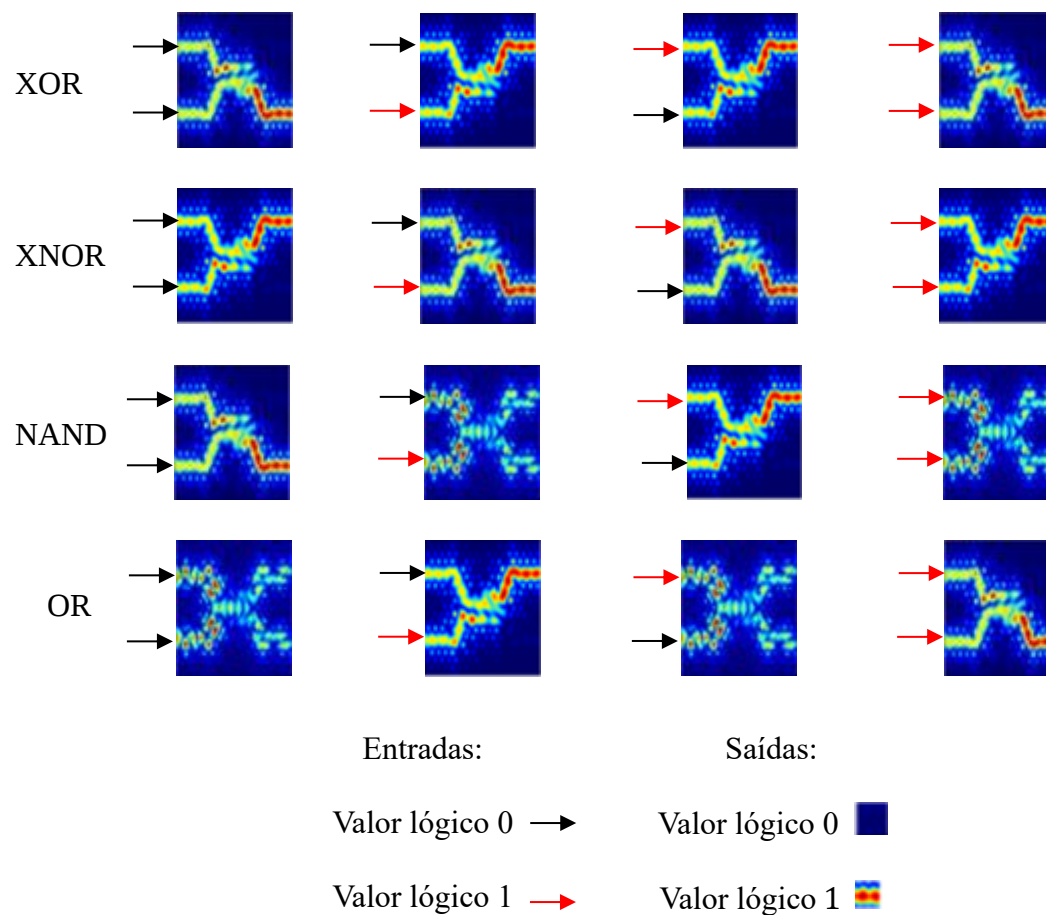


Figura 3.3 – Ilustração de todos os casos apresentados para o dispositivo implementado por meio do MMI.

Tabela 3.1 - A Tabela verdade para as portas XOR, XNOR, NAND e OR [1].

Valores Lógicos nas Portas		Valor Lógico na Saída (Porta C)			
Lógica para Porta A	Lógica para Porta B	XOR	XNOR	NAND	OR
0	0	0	1	1	0
0	1	1	0	1	1
1	0	1	0	1	1
1	1	0	1	0	1

Tabela 3.2 - A definição do valor lógico dos sinais BPSK nas portas (A e B), [1].

Portas Lógicas	Porta A		Porta B	
	Técnica BPSK1		Técnica BPSK2	
	Valor Lógico		Valor Lógico	
	Fase para lógica 1	Fase para lógica 0	Fase para lógica 1	Fase para lógica 0
XOR	0°	180°	90°	-90°
XNOR	0°	180°	-90°	90°
NAND	-90°	90°	0°	90°
OR	180°	0°	180°	90°

3.3 As portas lógicas projetadas por meio de anéis ressonantes

Foram analisadas e simuladas duas geometrias de portas lógicas ópticas por meio do PhC bidimensional, as geometrias são semelhantes, ambas compostas basicamente por hastes de Silício projetadas com dois guias de onda, para as respectivas portas de entrada, A e B, elaboradas por meio da remoção de uma fileira de hastes de Silício e um guia de onda em forma de Y, a estrutura permite realizar o direcionamento dos dois sinais de entrada, em um único guia e, conseqüentemente, apresentar um único sinal de saída.

A apresentação de um único sinal na saída nestes dispositivos pode ter amplitude alta ou baixa, que indica os respectivos níveis lógicos, um ou zero.

O guia em forma de Y foi acoplado na saída do dispositivo, junto a um par de anéis ressonantes para a porta OR e dois pares de anéis ressonantes para a porta AND, conforme apresentado na Figura 3.4 (a) e (b), respectivamente.

O presente trabalho analisou o comportamento do campo elétrico, para o comprimento de onda de 1,521 μm , por meio de simulações foi possível constatar o valor que esta estrutura apresenta um menor percentual de perdas, sendo utilizados os parâmetros do índice de refração, constante da rede e o raio das hastes de Silício de 3,59, 0,54 μm , e 0,1 μm , respectivamente, além de ser utilizado o modo TE [2].

Os valores citados no parágrafo anterior foram obtidos por meio de simulações, para alcançar os valores, que apresentam um menor percentual de perdas do sinal óptico propagado por meio destes dispositivos [2].

O Silício, utilizado neste dispositivo apresenta outro valor, isto é alcançado por meio da técnica de dopagem em laboratório, com outros materiais e para esta estrutura gera um menor percentual de perdas, além de uma melhor transmissão do sinal, [3] e [22].

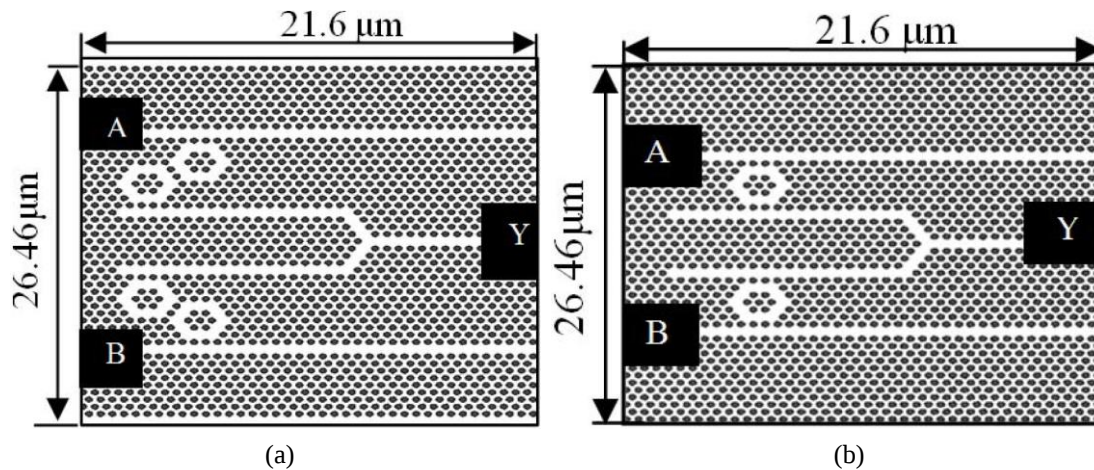


Figura 3.4 – (a) Representação da Porta AND. (b) Representação da Porta OR [2].

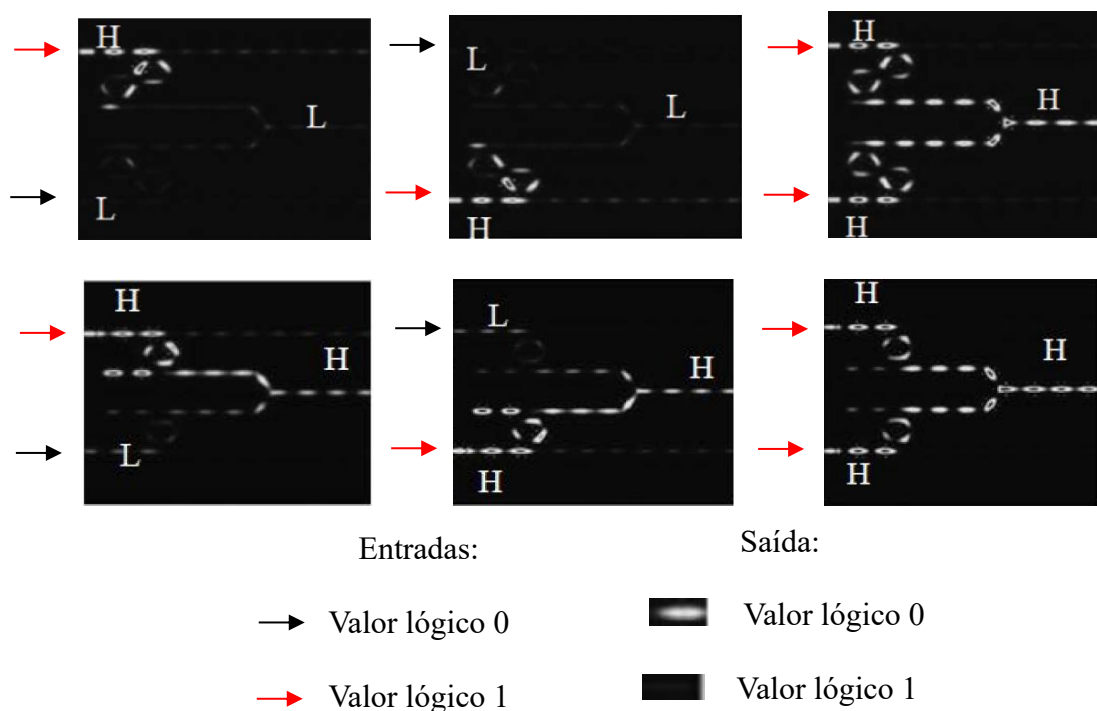


Figura 3.5 - Distribuição espacial do campo na porta lógica representando a operação lógica AND e OR [2].

3.4 Circuitos lógicos implementadas por meio da combinação de MMIs

Os três MMIs presentes no dispositivo óptico indicado na Figura 3.6, [3], na sua análise alterou-se o valor do raio das hastes presentes em sua estrutura, que correspondiam inicialmente a $0,11 \mu\text{m}$, em $\pm 10\%$, no índice de refração das hastes e do substrato, os quais correspondiam inicialmente, 3,33 e 1,33, passaram por aumentos de 0,11, até totalizarem 3,66 e 1,66, respectivamente, para este dispositivo foi analisado o comportamento do campo elétrico na porta de saída F.

Foi realizado o acoplamento de três MMIs, o novo dispositivo óptico passou a apresentar quatro entradas A, B, C e D, e três saídas E, F e G, para os sinais ópticos e

lógicos, sendo que, apenas uma destas saídas foi utilizada para analisar o seu campo elétrico, a porta F e, consequentemente, o seu nível lógico.

O dispositivo citado nesta seção [3], opera como um circuito lógico, *CL*, pois é constituído da junção de três dispositivos MMIs, cada um opera como uma porta lógica, em pontos intermediários, os MMI_1 e MMI_2 , em cada um deles ocorrem operações lógicas com os sinais de entrada, inseridos nas portas A e B, C e D, respectivamente, apresentado na Figura 3.7.

Posteriormente, foi realizada outra operação lógica, com um dos sinais de saída de cada MMI intermediário, MMI_1 e MMI_2 , os quais são inseridos no MMI_3 [3].

O dispositivo aqui citado possui quatro casos distintos de operação, apresentado na Figura 3.8, com amplitude do sinal nas portas de entrada que corresponde a 1 V/m e com as fases dos sinais que variam para cada caso, retratados na Tabela 3.3 e, obedecem a função lógica apresentada em sua referência, $F = ((A \text{ XNOR } B) + (C \text{ XNOR } D))$ [3], com o nível lógico do sinal na porta de saída F, medido apenas por meio da sua amplitude, assim como para o dispositivo apresentado em [1], quando $|E_z| \geq 1,0$ V/m, é detectada a presença do nível lógico alto e quando $|E_z| \leq 1,0$ V/m, é detectada a presença do nível lógico baixo.

Tabela 3.3 – Síntese dos quatro casos presentes no dispositivo apresentado em [3].

Caso	Fase do Sinal nas Portas de Entrada				Amplitude nas Portas de Saída			Valor Lógico na Saída
	A	B	C	D	E	F	G	
a)	180°	180°	180°	180°	0	1	0	1
b)	180°	180°	180°	0°	1	1	0	1
c)	0°	180°	180°	180°	0	1	1	1
d)	0°	180°	180°	0°	1	0	1	0

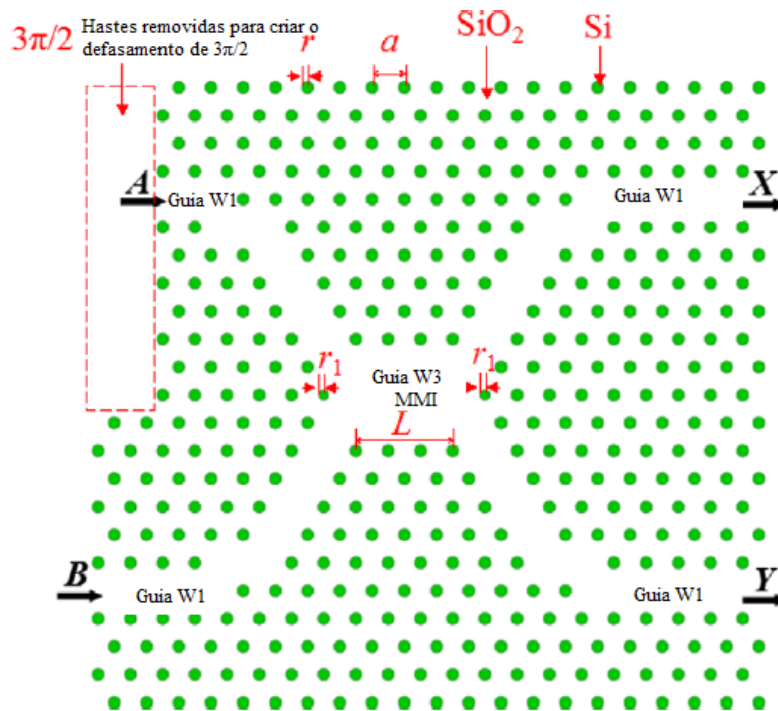


Figura 3.6 – Esquema do Guia de Onda W1 e do Guia de Onda W3, do MZI apresentado em [3].

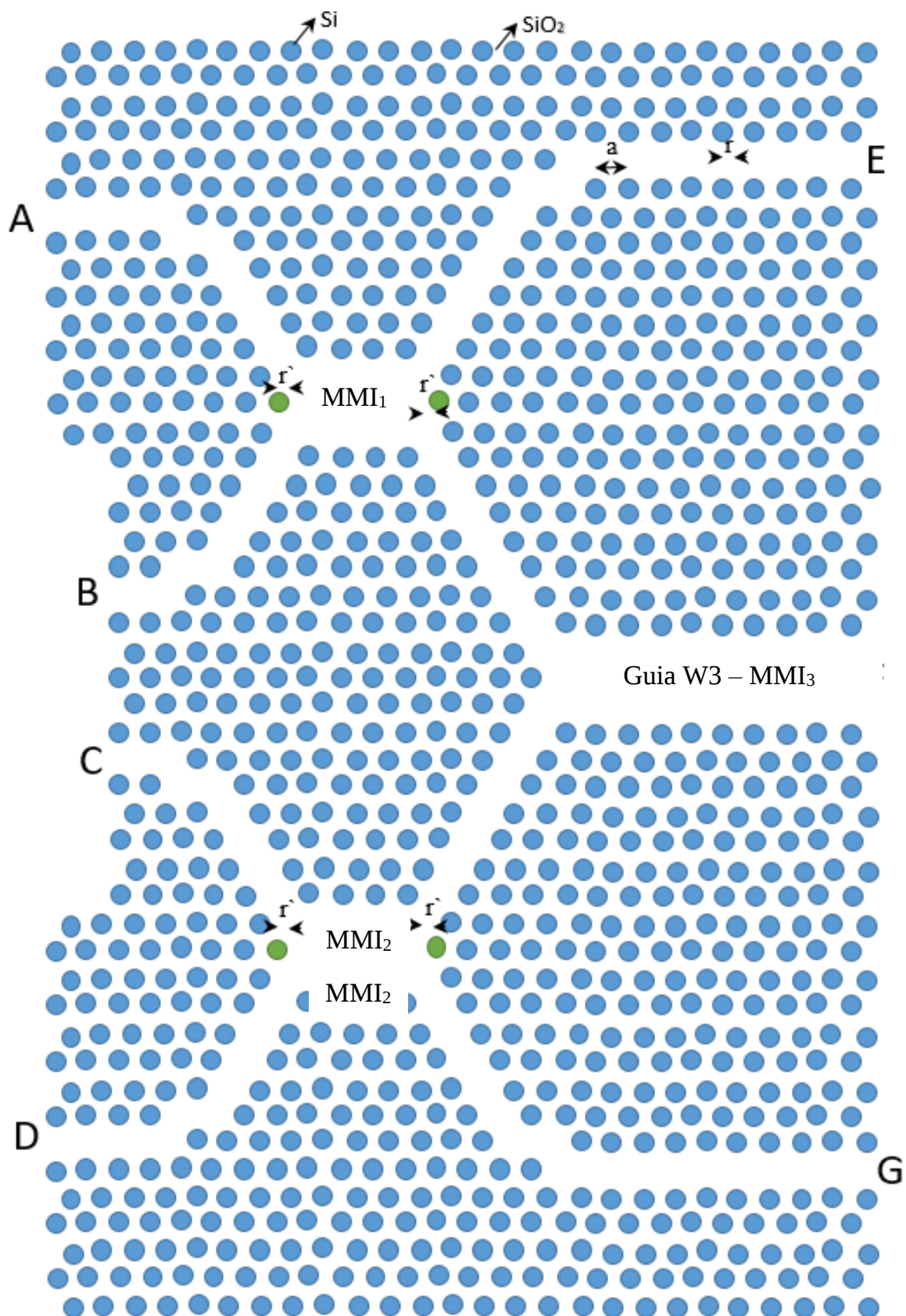


Figura 3.7 – Representação do dispositivo elaborado por meio da combinação de MMIs.

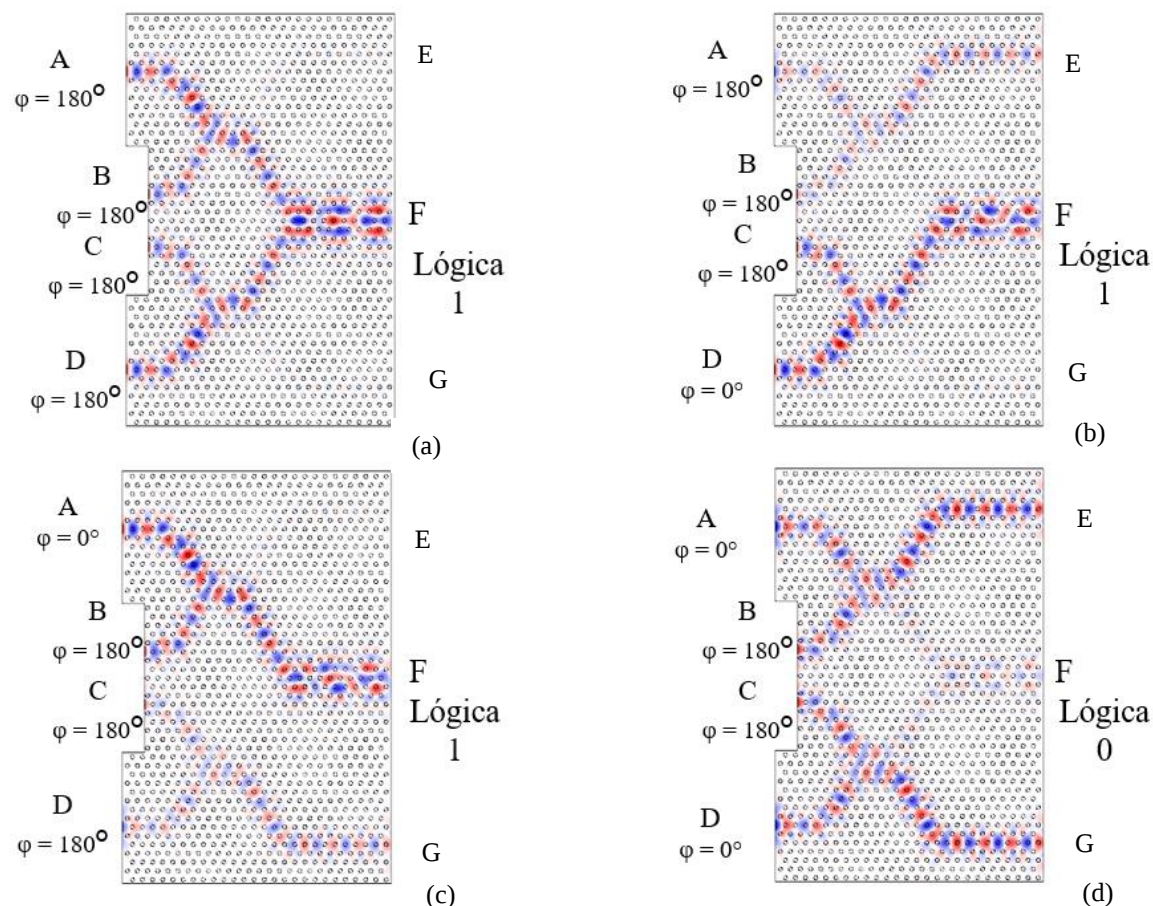


Figura 3.8 - (a) Distribuição espacial do campo quando a fase do sinal óptico nas portas A, B, C e D corresponde a 180° . (b) Distribuição espacial do campo quando a fase do sinal óptico nas portas A, B e C, corresponde a 180° , e na porta D corresponde a 0° , (c) Distribuição espacial do campo quando a fase do sinal óptico na porta A corresponde a 0° e, nas portas B, C e D corresponde a 180° . (d) Distribuição espacial do campo quando a fase do sinal óptico nas portas A e D corresponde a 0° e, nas portas B e C corresponde a 180° , [3].

4 ANÁLISE DA TOLERÂNCIA AO ERRO NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PORTAS LÓGICAS TOTALMENTE ÓPTICAS QUE UTILIZAM UM MMI

4.1 Introdução

Neste capítulo foram retratados os resultados do dispositivo óptico, apresentado em [1], sintetizado no capítulo anterior, na seção 3.2, foram feitas diversas análises aos erros que ocorrem em seu processo de fabricação e buscou-se ainda otimizar as suas dimensões. Foram realizadas simulações nos subintervalos de $1,261 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1,361 \mu\text{m}$ e de $1,50 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1,62 \mu\text{m}$, por estarem localizados na região do infravermelho, em que é possível transmitir o sinal em fibras e outros dispositivos ópticos.

A análise de situações como o posicionamento das hastes centrais, para uma variação de até 50% no seu posicionamento original, pois acima deste valor a sua distância já pode influenciar na próxima haste ao seu lado, ilustrado na Figura 4.1, com a variação no posicionamento da haste central calculada por meio da variável Δ_n , em (4.1), com n variando de zero a cinco, para todos os casos em que alterou-se o posicionamento da haste central.

Outras análises que foram feitas na mesma estrutura, para o comprimento de onda de $1,55 \mu\text{m}$, o raio passou por uma redução, de até 50%, pois reduções superiores a este valor causam alterações no valor lógico anteriormente apresentado e, também isoladamente nos eixos x e y , de forma que as hastes venham a assumir forma de elipses.

Posteriormente, a estrutura apresentada em [1] foi submetida a alterações nas suas hastes, que foram rotacionadas, com variações do seu ângulo, de 15° a 75° , divididos em intervalos de 15° entre os diferentes casos, desta forma foi possível fazer com que as hastes percorram 360° , varreu-se os eixos horizontal e vertical, para os cinco casos ilustrados nos gráficos da seção 4.4 e nas Figuras 4.4.1, 4.4.2, 4.4.3, e 4.4.4.

No comprimento de onda de $1,55 \mu\text{m}$, foi calculado o campo para uma diferença de fase de 0° , 90° e 180° , para as entradas. Foi monitorada a intensidade do campo elétrico para as portas de saída, C e D.

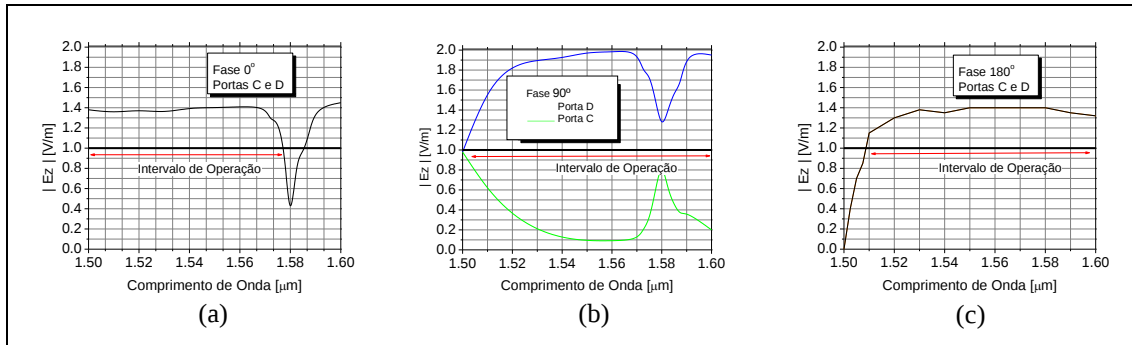


Figura 4.2.1 - Campo elétrico presente nas portas C e D, em regime permanente, sem alterações no posicionamento da haste central, quando o comprimento de onda foi variado no intervalo de 1,55 μm a 1,62 μm dependendo da fase relativa dos campos nas portas C e D (a) fase relativa 0° (b) fase relativa 90° na porta C e fase relativa 90° na porta D e (c) fase relativa 180°.

4.2.1.1 A Diferença de Fase de 0°

A diferença de fase de 0° entre os sinais ópticos inseridos nas portas A e B gera gráficos para o campo elétrico das Portas C e D idênticos, indicados na Figura 4.2.2, os valores apresentados para a intensidade do campo possuem um comportamento estável, em uma faixa de valores de aproximadamente 1,1 V/m.

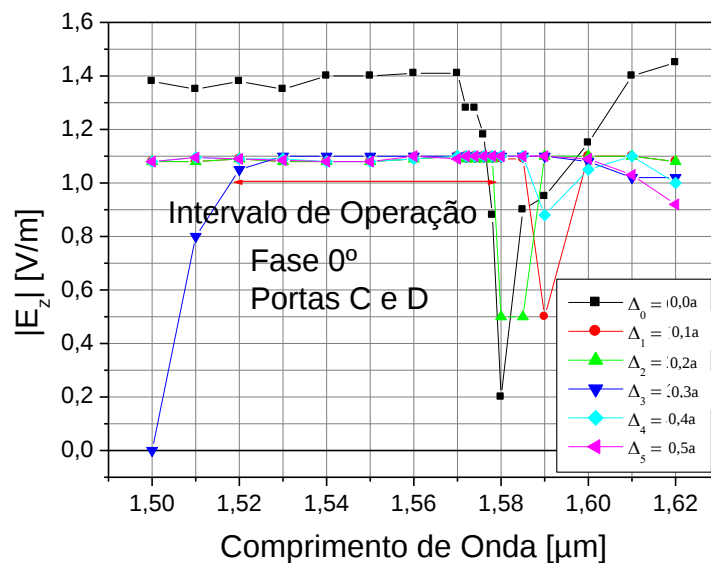


Figura 4.2.2 - Campo elétrico presente nas portas C e D, quando o Comprimento de Onda foi variado no intervalo de 1,55 μm a 1,62 μm com fase relativa 0°, para uma diferença no posicionamento da haste central do MMI, indicado por meio da variável Δ_n , varia de 0,1a até 0,5a do valor da constante dielétrica da rede, a.

No subintervalo entre 1,58 μm a 1,60 μm ocorreu uma queda abrupta dos valores do campo elétrico, nas portas C e D, foi motivada pela cavidade ressonantes do MMI, que gera esta queda abrupta dos valores, eles chegam a aproximadamente 0,5 V/m, quando o comprimento de onda corresponde a 1,59 μm , os valores voltam a crescer e se estabilizar,

próximos ao valor de 1,1 V/m, quando o comprimento de onda corresponde a 1,60 μm , indica a presença do nível lógico alto.

4.2.1.2 A Diferença de Fase de 90°

A análise da diferença de fase de 90° não ocorrem variações no posicionamento da haste central, com um comportamento bem similar nos trechos de crescimento exponencial e queda exponencial, para a porta C o campo se mantém abaixo da intensidade de 1 V/m e adotou-se uma tolerância de $\pm 10\%$, indica a presença do nível lógico baixo, conforme indicado na Figura 4.2.3.

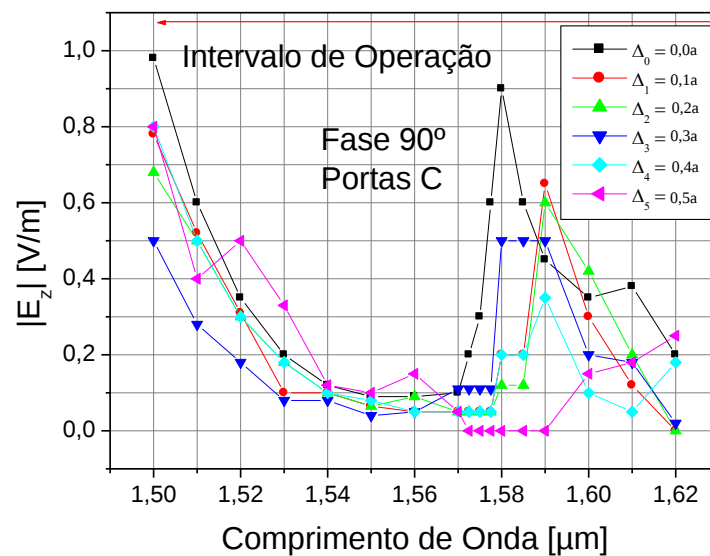


Figura 4.2.3 - Campo elétrico presente na porta C, quando o Comprimento de Onda foi variado no intervalo de 1,55 μm a 1,62 μm com fase relativa 90°, para uma diferença no posicionamento da haste central do MMI, indicado por meio da variável Δ_n , varia de 0,1a até 0,5a do valor da constante dielétrica da rede, a .

O gráfico da porta D apresenta um comportamento relativamente espelhado ao gráfico do campo para a porta C, indicado na Figura 4.2.4, enquanto o dispositivo não apresenta alterações detecta-se à existência do nível lógico alto em quase todo o intervalo, com a presença do nível lógico baixo apenas no subintervalo de 1,50 μm a 1,51 μm , para todos os casos da variável Δ_n , em todo o restante do intervalo foi detectado a presença do nível lógico alto, com variações entre as curvas que ocorrem para todos os casos analisados.

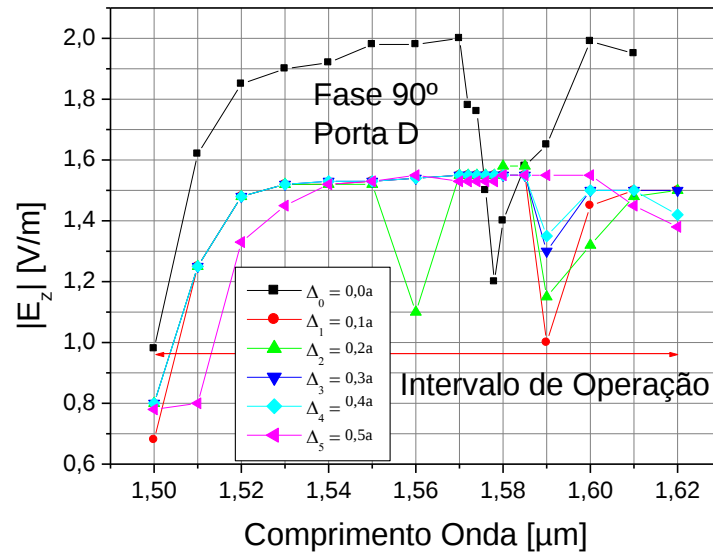


Figura 4.2.4 - Campo elétrico presente na porta D, quando o Comprimento de Onda foi variado no intervalo de 1,55 μm a 1,62 μm com fase relativa 90°, para uma diferença no posicionamento da haste central do MMI, indicado por meio da variável Δ_n , varia de 0,1a até 0,5a do valor da constante dielétrica da rede, a .

Uma observação importante a ser acrescentada, no subintervalo de 1,56 μm a 1,60 μm, foi detectado uma queda abrupta da intensidade do campo para todos os casos, com exceções do caso em que Δ_n corresponde a 0,5a, a queda só ocorre no final do subintervalo e para o caso em que Δ_n corresponde a 20%, ocorrem duas quedas, a primeira entre 1,55 μm a 1,57 μm, ocorre uma nova queda entre 1,59 μm a 1,62 μm, nas quais o campo elétrico, sofre uma queda de aproximadamente 1,55 V/m para aproximadamente 1,0 V/m. Esta queda abrupta do sinal óptico na porta de saída D da estrutura pode ser atribuída à frequência de ressonância do MMI da estrutura, o qual vem a se comportar como uma cavidade ressonante.

Constatou-se que todo o subintervalo, entre 1,55 μm a 1,57 μm, pode ser adotado como um intervalo de operação, quando a porta opera em uma diferença de fase de 90°.

4.2.1.3 A Diferença de Fase de 180°

As análises para variações no posicionamento das hastes centrais para a diferença de fase 180° permitiram detectar que a intensidade do campo é a mesma nas portas C e D, assim como para a diferença de fase de 0°, conforme indicado na Figura 4.2.5.

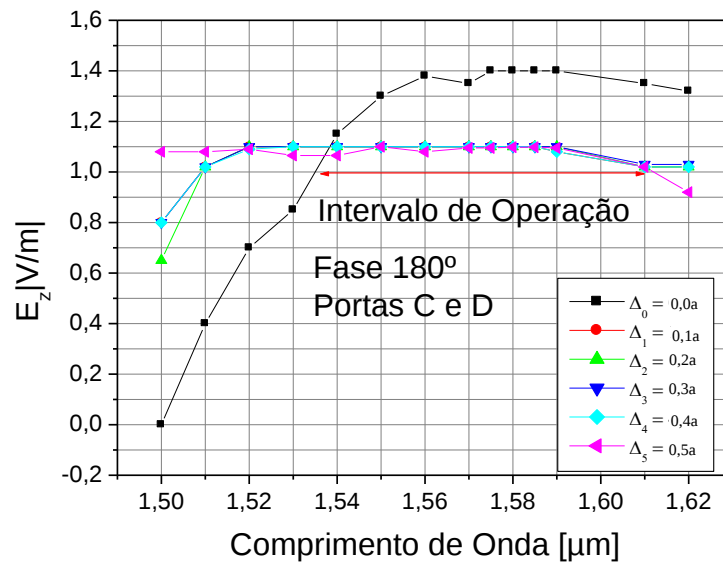


Figura 4.2.5 - Campo elétrico presente nas portas C e D, quando o Comprimento de Onda foi variado no intervalo de 1,55μm a 1,62μm com fase relativa 180°, para uma diferença no posicionamento da haste central do MMI, indicado por meio da variável Δ_n , varia de 0,1a até 0,5a do valor da constante dielétrica da rede, a .

Percebeu-se que na maior parte do subintervalo foi detectado a presença do nível lógico alto, que apresenta uma intensidade de campo levemente superior a 1V/m, dentro do intervalo de 1V/m a 1,1 V/m, no subintervalo de 1,50 μm a 1,52 μm, o campo apresenta intensidade inferior a 1 V/m, inicia o subintervalo com o valor de aproximadamente 0,1 V/m e cresce dentro deste subintervalo, de forma exponencial, até o valor de aproximadamente 1 V/m, para todos os casos em que Δ_n varia entre 0,1a até 0,4a.

No outro subintervalo de 1,52 μm a 1,53 μm a variável Δ_n passa por alterações e novamente ocorre um novo crescimento, com um perfil linear, chega a alcançar o valor de 1,1 V/m e se mantém estável neste valor até o comprimento de onda alcançar o valor de 1,60 μm, e volta a apresentar uma nova queda, até chegar no valor de aproximadamente 1 V/m e se estabiliza neste valor até o final do subintervalo.

Apenas quando Δ_n corresponde a 0,5a, o comportamento do campo elétrico na saída do dispositivo indicado na Figura 4.2.4, apresenta um formato diferente, sendo estável em quase todo o intervalo, corresponde a aproximadamente 1,1 V/m e vem a apresentar uma queda linear no subintervalo em que o comprimento de onda varia de 1,60 μm a 1,62 μm.

Conclui-se para a diferença de fase de 180° que existe a presença do nível lógico alto em quase todo o intervalo, mais precisamente de 1,52 μm a 1,62 μm e a presença do nível lógico baixo apenas no subintervalo de 1,50 μm à 1,52 μm, em todos os cinco casos da variação do parâmetro Δ_n .

Conclui-se que a análise do comportamento dos gráficos, para os três casos de diferença de fases entre os sinais de entrada, permitiu constatar que o dispositivo pode operar no subintervalo $1,51 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1,575 \mu\text{m}$, que mantém o mesmo valor lógico do sinal óptico das portas de saída do dispositivo.

4.3 Análise do comportamento do campo com variação no posicionamento, para um comprimento de onda no intervalo de $1,261 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1,361 \mu\text{m}$

A seção aqui apresentada possui os resultados que foram coletados por intermédio de simulações semelhantes as que foram apresentadas na seção anterior deste trabalho, com uma mudança que nesta seção foi analisado o comportamento do campo elétrico com a variação do comprimento de onda dentro no intervalo de $1,261 \mu\text{m}$ a $1,361 \mu\text{m}$, manteve-se os mesmos parâmetros a serem analisados, à variação do posicionamento da haste central, a mesma tolerância à variação do seu posicionamento, para que posteriormente seja calculado o campo nas mesmas diferenças de fase de 0° , 90° e 180° , para as portas de saída C e D, exatamente como na seção anterior.

As análises permitiram constatar que o dispositivo pode operar no subintervalo $1,27 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1,29 \mu\text{m}$, ele mantém o mesmo valor lógico do sinal óptico das portas de saída do dispositivo sem variações no posicionamento das hastes centrais.

4.3.1 A Diferença de Fase de 0°

A diferença de fases de 0° entre os sinais ópticos inseridos nas portas A e B gera gráficos para o campo elétrico das Portas C e D idênticos, os novos valores apresentados para a intensidade do campo indicam um comportamento semelhante ao do gráfico quando o dispositivo óptico não apresenta alterações, indicados na Figura 4.3.1, quando λ corresponde a aproximadamente $1,261 \mu\text{m}$, para quase todos os casos da variável Δ_n , com exceção dos casos em que Δ_n vale $0,4a$ e $0,5a$, indica a presença do nível lógico alto, com o módulo $|E_z| \geq 1,0 \text{ V/m}$.

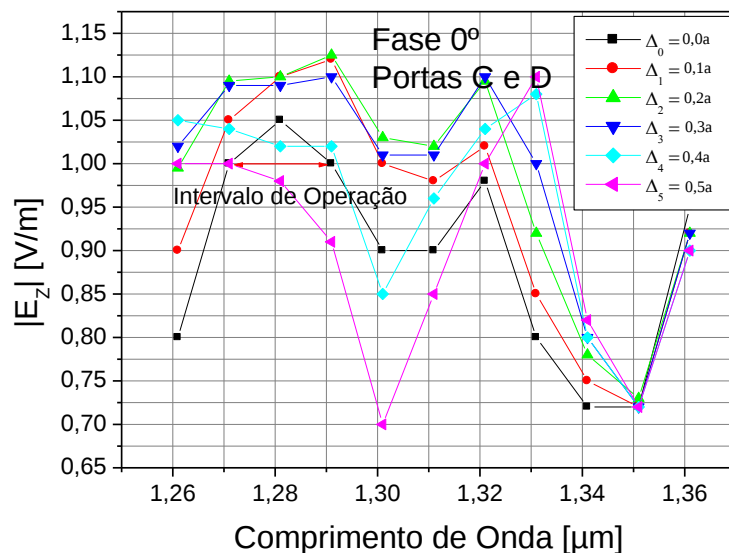


Figura 4.3.1 - Campo elétrico presente nas portas C e D quando o comprimento de onda foi variado no intervalo de $1,261 \mu\text{m}$ a $1,361 \mu\text{m}$ para uma diferença de fase relativa dos campos nas portas A e B de 0° , e o espaçamento da haste central do MMI, indicado por meio da variável Δ_n , varia de $0,1a$ até $0,5a$ do valor da constante dielétrica da rede, a .

Os gráficos apresentados posteriormente indicam uma queda do valor de E_z , quando λ alcança aproximadamente $1,291 \mu\text{m}$, pois este comprimento de onda sai da região de transmissão do sinal no dispositivo óptico, para todos os valores de Δ_n .

Observou-se que o λ alcança aproximadamente $1,301 \mu\text{m}$, os gráficos apresentam um crescimento acentuado e indicam a presença do nível lógico alto, inicia-se uma nova queda quando o λ alcança o valor de $1,321 \mu\text{m}$ até o final do intervalo, quando o comprimento de onda corresponde a $1,361 \mu\text{m}$, em todos os casos o campo sofre um crescimento acentuado, mas ainda mantendo-se abaixo de $1,0 \text{ V/m}$, indica a presença do nível lógico baixo.

O subintervalo do λ que se inicia em aproximadamente $1,271 \mu\text{m}$ até aproximadamente $1,281 \mu\text{m}$ pode ser considerado como o intervalo de operação para este dispositivo operar em uma diferença de fase de 0° .

4.3.2 A Diferença de Fase de 90°

Esta subseção foi dividida em duas, para as portas C e D, respectivamente, como indicado a seguir.

4.3.2.1 Porta C

Os resultados obtidos para a diferença de fase de 90° na porta C indicam o comportamento do gráfico para os diferentes valores de Δ_n estão ilustrados na Figura 4.3.2, os mesmos foram bem similares, mas com amplitudes distintas.

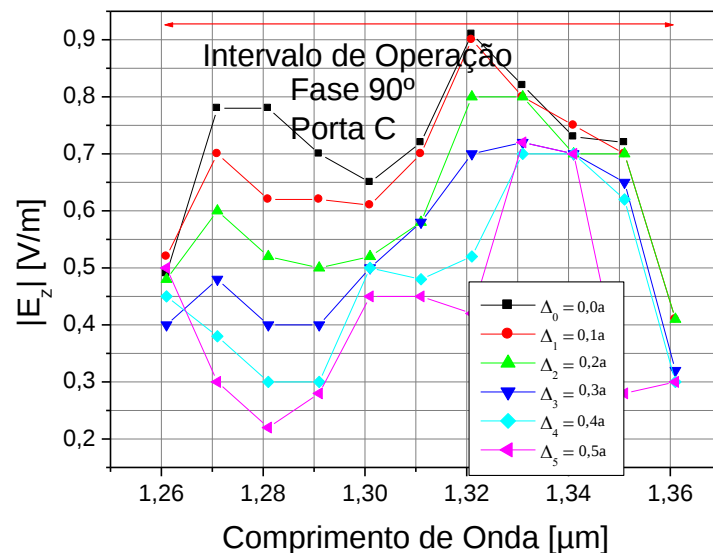


Figura 4.3.2 - Campo elétrico presente na porta C, quando o comprimento de onda foi variado no intervalo de $1,261 \mu\text{m}$ a $1,361 \mu\text{m}$ para uma diferença de fase relativa dos campos nas portas A e B é de 90° , e o espaçamento da haste central do MMI, indicado por meio da variável Δ_n , varia de $0,1a$ até $0,5a$ do valor da constante dielétrica da rede, a .

O comportamento do campo de todos os gráficos citados nesta seção se mantém abaixo de 1 V/m em todo o intervalo, indica a presença do nível lógico baixo, para todos os casos citados, assim como no caso em que não ocorrem alterações nas configurações do dispositivo, logo, todo o intervalo do comprimento de onda que se inicia em aproximadamente 1,261 μm a 1,361 μm , pode ser considerado como o intervalo de operação para este dispositivo que opera em uma diferença de fase de 90° e usa a porta C como saída deste dispositivo, indica a presença do nível lógico baixo.

4.3.2.2 Porta D

O comportamento do gráfico para a diferença de fase de 90° na porta D com os diferentes valores de Δ_n estão ilustrados na Figura 4.3.3, o gráfico do comportamento do campo sem alterações, Δ_0 , apresenta uma queda acentuada no subintervalo que λ varia entre com 1,261 μm a 1,271 μm .

Os cinco valores de Δ_n mantém a intensidade do campo acima de 1 V/m e indicam a presença do nível lógico alto, conforme indicado na Figura 4.3.3, eles ilustram a influência do posicionamento das hastes centrais na intensidade do campo.

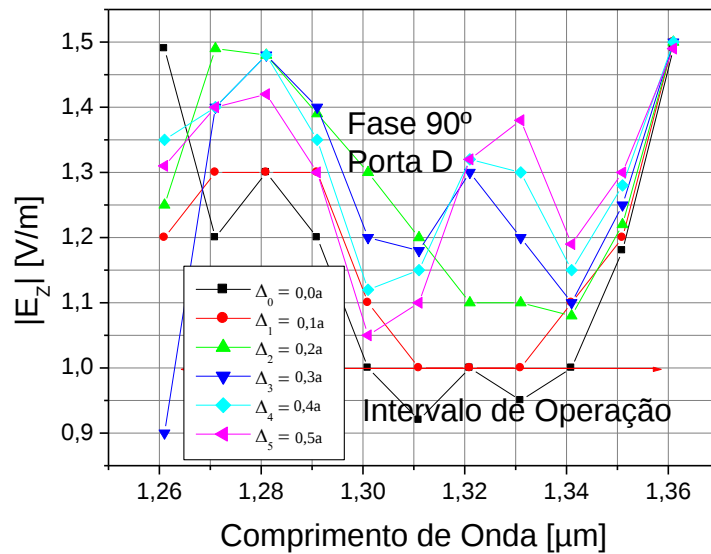


Figura 4.3.3 - Campo elétrico presente na porta D quando o comprimento de onda foi variado no intervalo de 1,261 μm a 1,361 μm para uma diferença de fase relativa dos campos nas portas A e B é de 90°, e o espaçamento da haste central do MMI, indicado por meio da variável Δ_n , varia de 0,1a até 0,5a do valor da constante dielétrica da rede, a .

O segundo subintervalo, no qual λ está entre 1,271 μm a 1,281 μm não ocorrem alterações, apresenta um crescimento para os valores de Δ_n correspondentes a 0,1a, 0,2a e 0,5a, nos quais ocorrem uma estabilização dos valores, eles não sofrem ou sofrem apenas uma leve alteração, para Δ_n correspondente a 0,3a e 0,4a, apresentam uma queda até o λ alcançar o valor de 1,301 μm , queda pela qual todos os casos apresentados no gráfico irão passar, apenas no caso que Δ_n não sofre alterações ocorre a saída da região do nível lógico alto e como consequência, do intervalo de operação.

O gráfico do campo para os valores de Δ_n no último subintervalo, λ está localizado entre 1,341 μm a 1,361 μm , em todos os casos ocorre um crescimento acentuado, ficam com uma intensidade acima de 1,0 V/m e indicam a presença do nível lógico alto, logo, o intervalo do comprimento de onda que se inicia em aproximadamente 1,265 μm a 1,271 μm pode ser considerado como o intervalo de operação para este dispositivo operar em uma diferença de fase de 90°, quando usa-se a porta D como saída deste dispositivo, indica a presença do nível lógico alto.

4.3.3 A Diferença de Fase de 180°

A análise da diferença de fase 180° permitiu detectar resultados idênticos para a intensidade do campo nas portas de saída C e D, as quais apresentam um comportamento do campo idêntico para os diferentes casos da variável Δ_n .

Para o ponto inicial do intervalo citado nesta seção, todos os casos da variável Δ_n apresentam um crescimento acentuado para a intensidade do campo, até o λ alcançar o valor de 1,281 μm , como todos os casos apresentam uma intensidade do campo superior a 1,0 V/m, indicado na Figura 4.3.4, caracteriza-se a presença do nível lógico alto, posteriormente, no subintervalo no qual o λ corresponde a 1,281 μm a 1,291 μm , em todos os casos ocorre uma queda abrupta do valor de $|E_z|$ nas portas de saída C e D, ficam abaixo de 1,0 V/m e indicam a presença do nível lógico baixo, mantendo-se estável até o λ alcançar aproximadamente 1,311 μm .

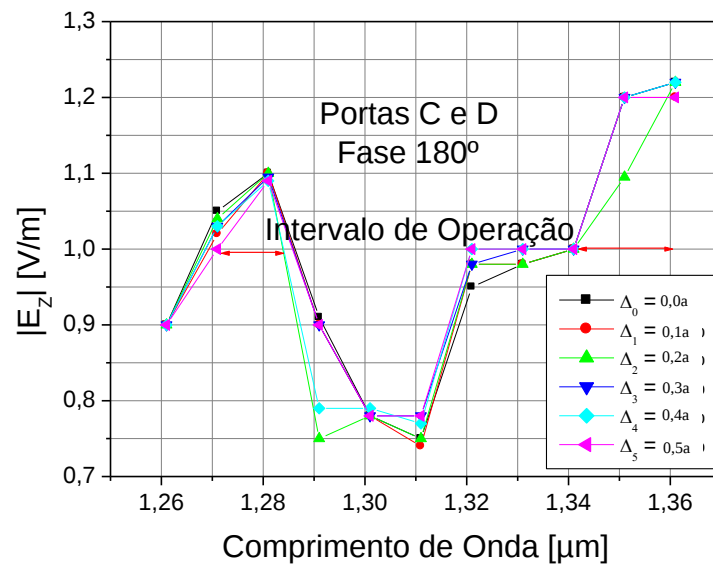


Figura 4.3.4 - Campo elétrico presente nas portas C e D quando o comprimento de onda foi variado no intervalo de 1,261 μm a 1,361 μm para uma diferença de fase relativa dos campos nas portas A e B é de 180°, e o espaçamento da haste central, do MMI, indicado por meio da variável Δ_n , varia de 0,1a até 0,5a do valor da constante dielétrica da rede, a .

A intensidade do campo elétrico para o último subintervalo, no qual o λ está localizado entre 1,311 μm a 1,361 μm , ocorre um crescimento gradativo da intensidade

do campo, volta novamente a indicar a presença do nível lógico alto, quando o λ alcança o valor de $1,361 \mu\text{m}$ em todos os casos deste subintervalo.

Podem ser considerados como intervalos de operação para este dispositivo, para uma diferença de fase de 180° , os subintervalos em que λ varia entre com $1,271 \mu\text{m}$ a $1,285 \mu\text{m}$ e o subintervalo com λ varia entre com $1,341 \mu\text{m}$ a $1,361 \mu\text{m}$.

4.4 Análise do comportamento do campo o comprimento de onda de $1,55 \mu\text{m}$, variou-se o tamanho das hastes, nas direções x e y, isoladamente

Foi analisado o comportamento do campo com uma tolerância a variação do tamanho das hastes de zero a 100%, conforme ilustrado nas Figuras 4.4.1 e 4.4.2, para os eixos x e y, respectivamente, para o λ correspondente a $1,55 \mu\text{m}$, com o seu raio padrão. Inicialmente foi alterado o valor do raio com aumentos de 10% no seu tamanho original e calculado o campo elétrico para uma diferença de fase de 0° , 90° e 180° para as portas de saída C e D.

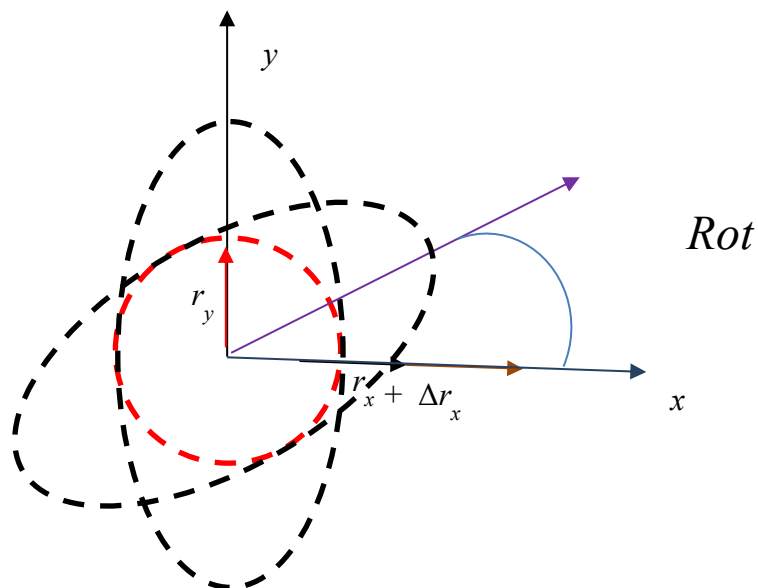


Figura 4.4.1 – Diagrama dos diferentes tamanhos das hastes, para uma variação do raio apenas no eixo x, rotacionadas de 0° a 75° para o dispositivo apresentado em [1].

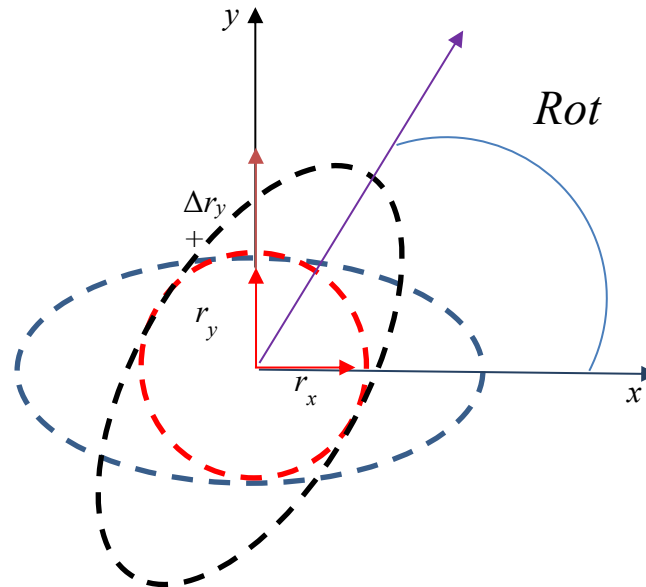


Figura 4.4.2 – Diagrama dos diferentes tamanhos das hastes, para uma variação do raio apenas no eixo y , rotacionadas de 0° a 75° para o dispositivo apresentado em [1].

4.4.1 Análise do comportamento do campo para um comprimento de onda de $1,55 \mu\text{m}$

4.4.1.1 A Diferença de Fase de 0°

4.4.1.1.1 Variação do raio no eixo x

A análise da diferença de fase de 0° para uma variação do raio no eixo x apresentou novos gráficos, que apresentam um comportamento idêntico para as portas C e D, ilustrado na Figura 4.4.3, para todos os casos do valor da rotação das hastes há uma queda gradativa até o valor do raio corresponder a 50%, indicam a presença do nível lógico alto neste subintervalo da variação do tamanho do raio.

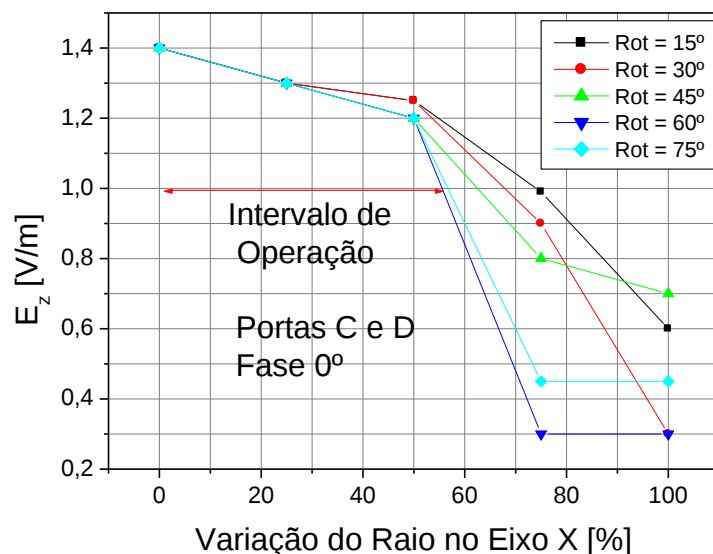


Figura 4.4.3 - Campo elétrico presente nas portas C e D, quando o comprimento de onda é 1,55 μm , variou-se o tamanho do raio apenas no eixo x até 100% do seu valor inicial, com uma variação da sua rotação, indicada por meio da variável *Rot*, de 15° a 75°, com fase relativa 0°.

A rotação das hastes está indicada na figura desta seção, por meio da variável *Rot*, neles ocorre uma queda acentuada no restante deste subintervalo de valores, variações no tamanho do raio indicam a presença do nível lógico baixo em todo este segundo subintervalo da variação do tamanho do raio.

Detectou-se conforme o valor da rotação das hastes varia, a intensidade da queda dos valores do $|E_z|$ no gráfico se torna mais acentuada e o valor do campo assume valores mais baixos até o final do subintervalo.

4.4.1.1.2 Variação do raio no eixo y

A análise permitiu constatar resultados similares aos que foram apresentados na subseção anterior e, novamente um comportamento idêntico para as portas C e D, indicado na Figura 4.4.4, para todos os casos do valor da rotação das hastes há uma queda gradativa até o valor do raio corresponder a 50%, que indica presença do nível lógico alto em todo este subintervalo da variação do tamanho do raio apenas para o eixo y.

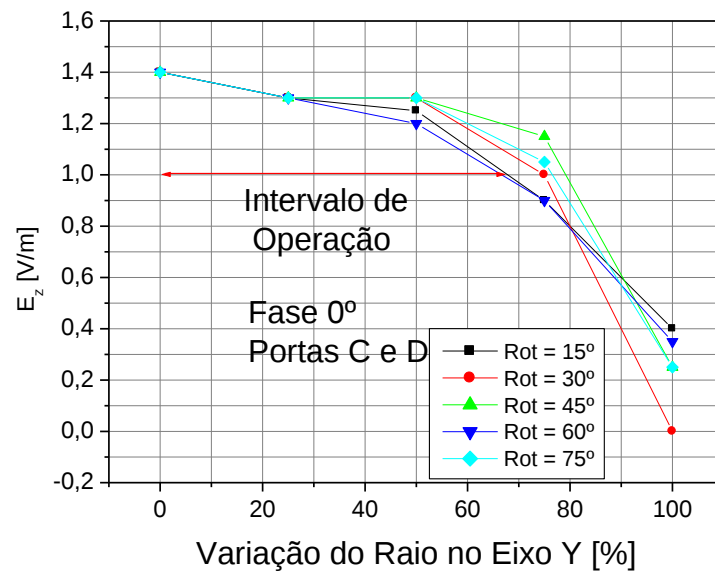


Figura 4.4.4 - Campo elétrico presente nas portas C e D, quando o comprimento de onda é $1,55 \mu\text{m}$, variou-se o tamanho do raio apenas no eixo y até 100% do seu valor inicial, com uma variação da sua Rotação, indicada por meio da variável *Rot*, de 15° a 75° , com fase relativa 0° .

Posteriormente, ocorreu uma queda mais acentuada para todos os casos, indicados na mesma figura, caracteriza a presença do nível lógico baixo em todo este segundo subintervalo da variação do tamanho do raio, entre aproximadamente 60% e 100% de aumento no raio das hastes para o eixo y, $|E_z|$ alcança valores próximos a zero.

4.4.2.1 A Diferença de Fase de 90°

4.4.2.1.1 Análise do campo na porta C para variação do raio no eixo x

A análise da diferença de fase de 90° com a variação do raio no eixo x permitiu detectar gráficos que apresentam um comportamento bastante similar, devido à variação nas dimensões e no ângulo de rotação das hastes ser lenta e gradativa, ilustrado na Figura 4.4.5.

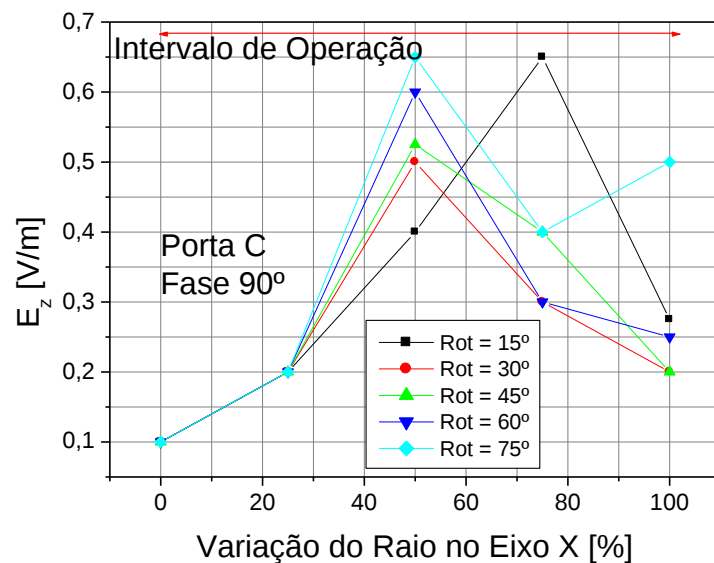


Figura 4.4.5 - Campo elétrico presente na porta C, quando o comprimento de onda é 1,55 μm , variou-se o tamanho do raio apenas no eixo x até 100% do seu valor inicial, com uma variação da sua rotação, indicada por meio da variável *Rot*, de 15° a 75°, com fase relativa 90°.

O campo aparenta ter um comportamento não tão espelhado para as portas C e D, como foi apresentado nas seções anteriores, devido as alterações nos padrões do dispositivo, a exemplo do raio e do ângulo de rotação das hastes, *Rot*, todos os casos do valor da rotação das hastes apresentam um comportamento relativamente similar, com trechos de crescimento gradativo e queda gradativa do valor do campo, para a porta C o campo se mantém abaixo da intensidade de 1 V/m em todo o subintervalo, indica a presença do nível lógico baixo em todo o intervalo da variação do tamanho do raio.

Detectou-se que ocorre um crescimento acentuado da intensidade do campo, conforme ocorre um aumento no tamanho do raio no eixo x, até alcançar o valor de aproximadamente 50% e, a partir deste valor os gráficos citados apresentam uma queda acentuada, até corresponderem a aproximadamente 0,2 V/m, com exceção da rotação de 15°, valor que o campo cresce até aproximadamente 80% e, posteriormente, vem a apresentar uma queda acentuada, assim como os demais casos.

4.4.2.1.2 Análise do campo na porta D para variação do raio no eixo x

A porta D do gráfico ilustrado na Figura 4.4.6 apresenta um comportamento levemente espelhado ao comportamento do gráfico do campo para a porta C, logo, detecta-se à existência do nível lógico alto em quase todo o intervalo, ilustrado na Figura 4.4.6 e apresenta nível lógico baixo apenas no subintervalo de 70% a 100%, em todos cinco gráficos.

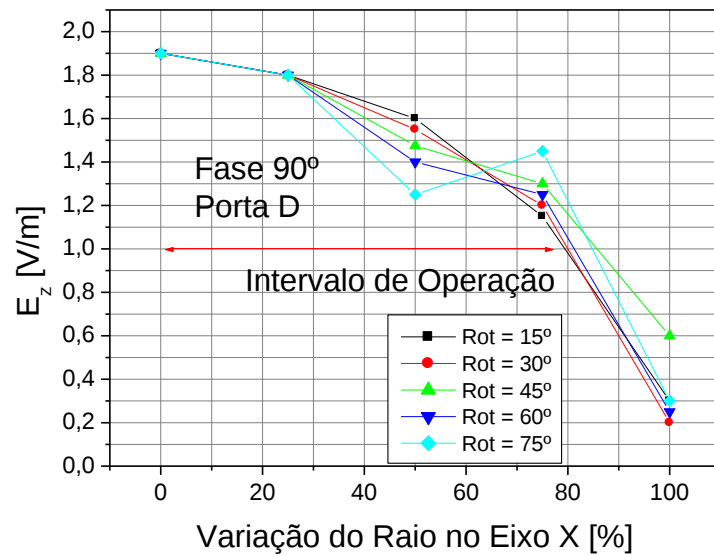


Figura 4.4.6 - Campo elétrico presente na porta D, quando o comprimento de onda é $1,55 \mu\text{m}$, variado o tamanho do raio apenas no eixo x até 100% do seu valor inicial, com uma variação da sua rotação, indicada por meio da variável *Rot*, de 15° a 75° e com fase relativa 90° .

4.4.2.1.3 Análise do campo na porta C para variação do raio no eixo y

A análise da diferença de fase de 90° com variação do raio no eixo y e para uma variação no raio das hastes apenas nesta direção permitiu detectar que, as curvas apresentam um comportamento bastante similar entre si e, com o gráfico apresentado para uma variação apenas no eixo x, ilustrado na Figura 4.4.7, constatou-se que ocorre um crescimento acentuado da intensidade do campo e ocorre também um aumento no tamanho do raio, até alcançar o valor de aproximadamente 50%, a partir deste valor os gráficos citados apresentam uma queda acentuada, até corresponderem a aproximadamente 0,2 V/m.

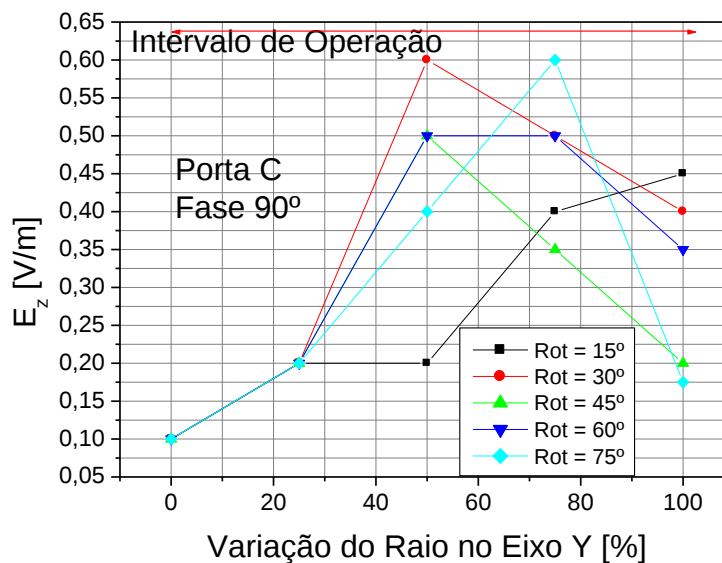


Figura 4.4.7 - Campo elétrico presente na porta C, quando o comprimento de onda é 1,55 μm , variou-se o tamanho do raio apenas no eixo y até 100% do seu valor inicial, com uma variação da sua rotação, indicada por meio da variável *Rot*, de 15° a 75°, com fase relativa 90°.

A exceção foi para a rotação de 15°, valor em que o campo apresenta uma estabilização do seu valor até aproximadamente 50%, posteriormente vem a apresentar um novo crescimento acentuado até o final do subintervalo, no qual alcança o valor de aproximadamente 0,50 V/m para o valor de rotação de 75°, o campo continua a crescer até alcançar o valor de 70% para a variação no tamanho do raio e, vem apresentar uma queda acentuada assim como os demais casos, sendo assim, foi detectado a presença do nível lógico baixo em todo o subintervalo, apresentado na Figura 4.4.7.

4.4.2.1.4 Análise do campo na porta D para variação do raio no eixo y

O comportamento do campo na porta D permitiu elaborar um gráfico que apresenta um comportamento levemente espelhado ao comportamento do gráfico do campo para a porta C deste mesmo caso, logo detecta-se à existência do nível lógico baixo apenas no subintervalo de 60% a 100% em todos cinco gráficos, apresentado na Figura 4.4.8.

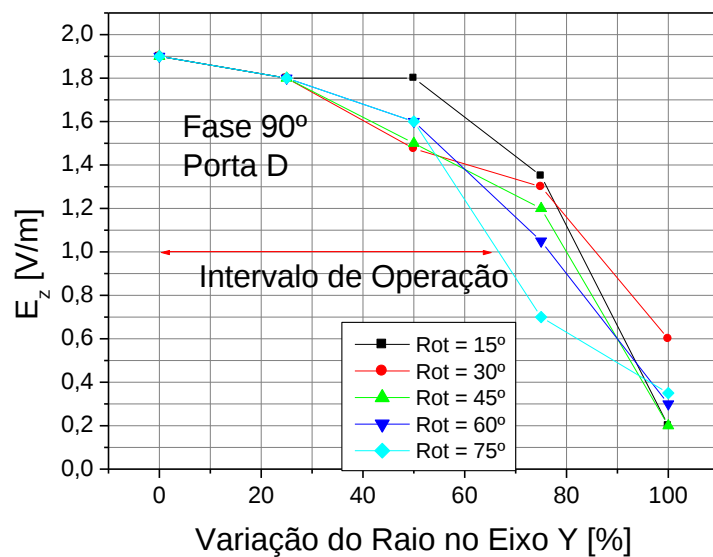


Figura 4.4.8 - Campo elétrico presente na porta D, quando o comprimento de onda é $1,55 \mu\text{m}$, variou-se o tamanho do raio apenas no eixo y até 100% do seu valor inicial, com uma variação da sua rotação, indicada por meio da variável *Rot*, de 15° a 75° e com fase relativa 90° .

4.4.3 A Diferença de Fase de 180°

4.4.3.1 Variação do raio no eixo x

Os resultados desta variação estão apresentados na Figura 4.4.9, para todos os casos, com exceção de quando o valor da rotação das hastes corresponde a 75° , que a queda ocorre de forma mais acentuada aos outros casos, foi detectado a presença do nível lógico alto até o percentual do valor do raio corresponder a 50% e, ocorrer uma queda acentuada, que deixa de corresponder ao nível lógico alto e passa a corresponder ao nível lógico baixo.

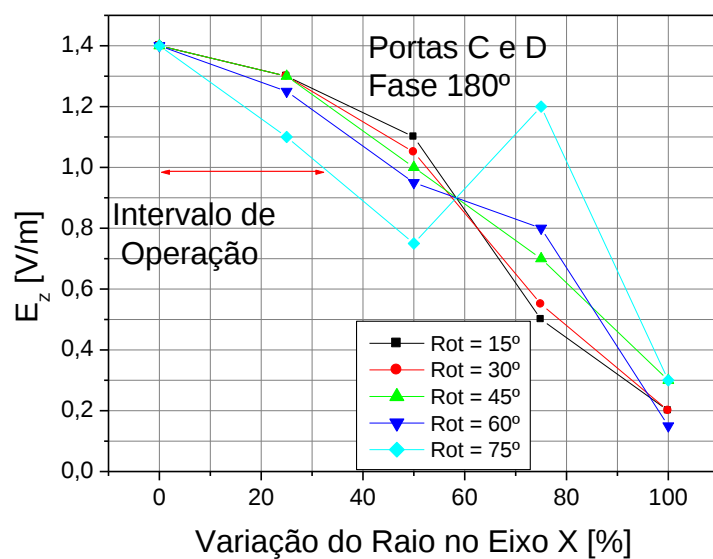


Figura 4.4.9 - Campo elétrico presente nas portas C e D, quando o comprimento de onda é $1,55\ \mu\text{m}$, variou-se o tamanho do raio apenas no eixo x até 100% do seu valor inicial, com uma variação da sua rotação, indicada por meio da variável Rot , de 15° a 75° , com fase relativa 180° .

O caso em que a rotação corresponde a 75° , quando o valor do raio corresponde a 50%, ocorre um crescimento do valor do campo, que volta novamente a decrescer quando o valor do raio alcança o percentual de aproximadamente 80% e indica a presença do nível lógico baixo, para os demais casos ocorre uma queda acentuada até o final do subintervalo, com os gráficos que deixam de apresentar o nível lógico alto, quando a variação do raio das hastes no eixo x alcança o valor aproximadamente 30% e indicam a região de intervalo útil de operação até o valor de 30%, apresentado na Figura 4.4.9.

4.4.3.2 Variação do raio no eixo y

Os resultados desta variação estão apresentados na Figura 4.4.10 e para todos os casos citados para esta subseção foi possível detectar a presença do nível lógico alto, até o percentual do valor do raio corresponder a 40%, a partir deste valor deixa de corresponder ao nível lógico alto e passa a corresponder ao nível lógico baixo.

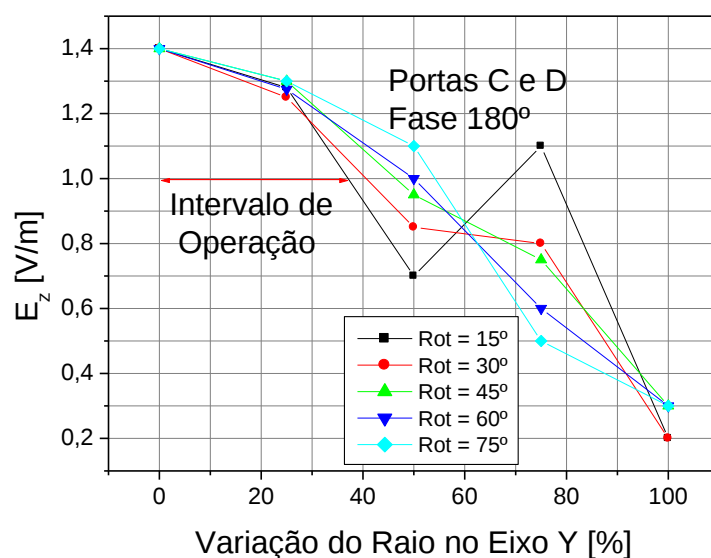


Figura 4.4.10 - Campo elétrico presente nas portas C e D, quando o comprimento de onda é $1,55\ \mu\text{m}$, variou-se o tamanho do raio apenas no eixo y até 100% do seu valor inicial, com uma variação da sua rotação, indicada por meio da variável Rot , de 15° a 75° , com fase relativa 180° .

Uma observação importante sobre o valor da rotação das hastes que corresponde a 15° , foi que a queda ocorre de forma mais acentuada aos outros casos e, quando o valor do raio corresponde a 50%, ocorre um crescimento do valor do campo, que posteriormente volta novamente a decrescer, quando o valor do raio alcança o percentual de aproximadamente 80%.

4.5 Redução do raio das hastes

A redução do raio das hastes em até 50%, com passos de 10% e, a análise do comportamento do campo elétrico na saída do dispositivo, para uma diferença de fase entre os sinais de entrada das portas A e B de 0° , 90° e 180° , com o comprimento de onda de $1,55 \mu\text{m}$, permitiu detectar que a amplitude do campo elétrico na saída do dispositivo sofreu uma discreta variação para os três casos, apresentados nos quatro gráficos da Figura 4.5.

Para o caso referente a uma diferença de fases de 0° ocorreu uma variação mais perceptível, com uma queda da amplitude do sinal do campo elétrico nas portas C e D, de $1,3 \text{ V/m}$ para até $1,0 \text{ V/m}$, manteve-se no limite da indicação do nível lógico alto.

A diferença de fases de 90° entre as portas de entrada A e B gerou valores de $|E_z|$ na porta C que, apresentaram uma variação bem discreta, oscilaram entre $0,0 \text{ V/m}$ e $0,1 \text{ V/m}$, que indica a presença do nível lógico baixo e, para a porta D, oscilou entre $1,4 \text{ V/m}$ e $1,53 \text{ V/m}$, que indica a presença do nível lógico alto.

A diferença de fases de 180° entre as portas A e B gerou valores para o campo elétrico nas portas C e D que, se mantiveram constantes em todo o intervalo, indicado na Figura 4.5.

Conclui-se que foi possível utilizar todo o intervalo de redução do raio, até 50% de redução, o dispositivo mantém um comportamento estável e sem alterações significativas.

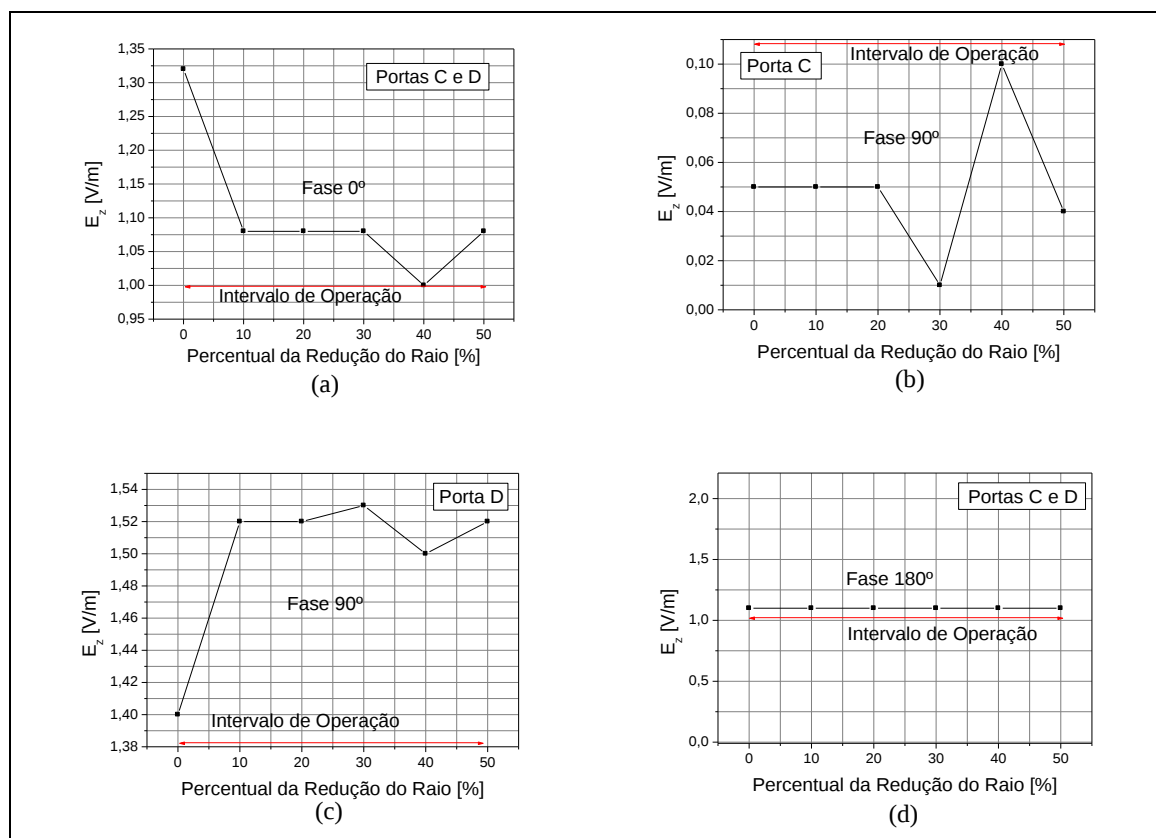


Figura 4.5 - Campo elétrico presente nas portas C e D quando o comprimento de onda é de $1,55 \mu\text{m}$, dependendo da fase relativa dos campos nas portas C e D (a) fase relativa 0° , (b) fase relativa 90° na porta e C, (c) fase relativa 90° na porta D e (d) fase relativa 180° , reduzindo o tamanho do raio das hastes em até 50%, sem rotação.

5 A REDUÇÃO NAS DIMENSÕES DO DISPOSITIVO IMPLEMENTADO COM ANEL RESSONANTE

5.1 Introdução

A redução nas dimensões dos dispositivos baseados em anéis ressonantes apresentados neste capítulo foi realizada por meio de uma redução no número de hastes totais do dispositivo.

Desta forma, buscou-se uma forma diferente de reduzir as dimensões destes dispositivos, que utilizavam anéis ressonantes, com a finalidade de realizar a redução das dimensões destes dispositivos ópticos, os quais utilizavam o comprimento de onda de $1,53 \mu\text{m}$, pois foi para este valor que o dispositivo apresentou um comportamento mais estável, ilustrado na Figura 5.1 [2].

5.2 A Porta AND

A redução nas dimensões do dispositivo capaz de simular a porta AND, apresentado no Capítulo 3, na seção 3.3, ilustrado na Figura 3.5 (a), o dispositivo projetado por meio da redução do número de hastes em ambas as direções, de acordo com a referência [2] apresenta dimensões de 40×49 hastes, as quais são reduzidas para 19×37 hastes, ilustrado na Figura 4.6.1.

As reduções significativas no tamanho do dispositivo, não sofreu alterações no valor do raio de suas hastes, na constante da rede, nos guias de onda e nos anéis ressonantes, apresentam um raio de $0,1 \mu\text{m}$ e uma constante da rede de $0,54 \mu\text{m}$.

O dispositivo continuou a apresentar resultados bem similares aos apresentados em [2], a porta AND com um valor para a Transmissão, a qual trataremos neste trabalho pela variável T , que corresponde a relação entre $\left| \frac{E_{out}}{E_{in}} \right|^2 > 0,8$, calculada por meio da equação 5.1, na presença do nível lógico alto e, $T < 0,4$ na presença do nível lógico baixo, conforme apresentado na Tabela 5.1.

A outra variável muito importante nesta análise, Relação de Contraste, RC_2 , para este dispositivo, foi calculada por meio da equação 5.2, entre os níveis lógicos alto e baixo, medida em dB, para a porta AND este valor corresponde a aproximadamente 6 dB, que foi obtido relacionando E_{in} e E_{out} , como foi relatado em [2].

$$T = \left| \frac{E_{out}}{E_{in}} \right|^2 \quad (5.1)$$

$$RC_2 = 10 \log_{10} \left(\frac{E_{out}^2}{E_{in}^2} \right) \quad (5.2)$$

Tabela 5.1 - Tabela Verdade Para a Porta Lógica AND, indicada na Figura 4.6.1, com os resultados alcançados para a Transmissão na sua estrutura, [2].

A	B	Saída Lógica	$T = \left \frac{E_{out}}{E_{in}} \right ^2$	Relação de Contraste, $RC_2 \cong 6 \text{ dB}$
0	0	0	0	
0	1	0	< 0,4	
1	0	0	< 0,4	
1	1	1	> 0,8	

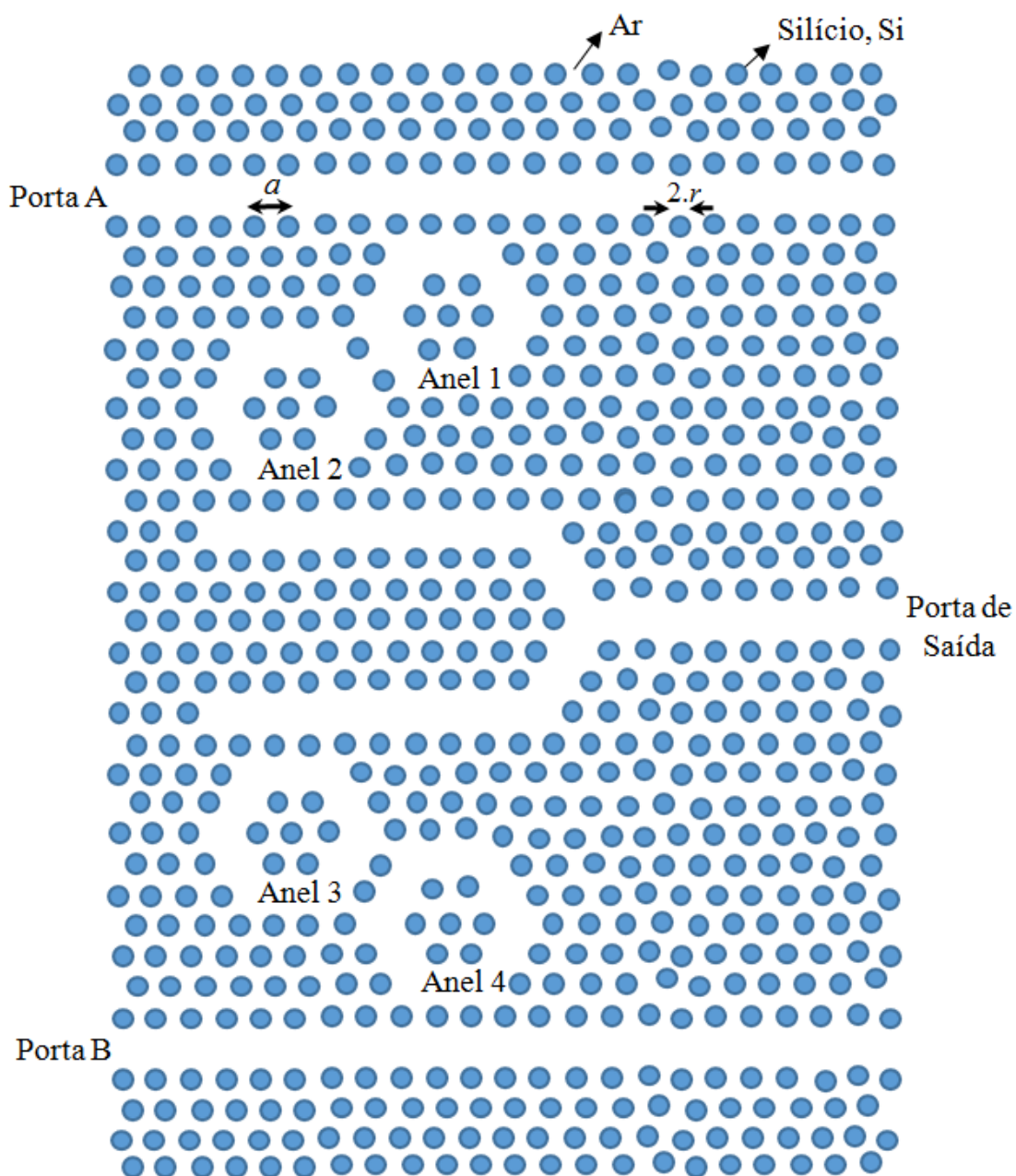


Figura 5.1 - Porta AND implementadas com anéis ressonantes, e com dimensões otimizadas.

5.3 A Porta OR

A redução nas dimensões da porta OR, apresentada no Capítulo 3, na Figura 3.5 (b), por meio da redução do número de hastes em ambas as direções, de acordo com a referência [2], apresenta dimensões de 40 x 49 hastes, as quais são otimizadas para 19 x 37 hastes, conforme ilustrado na Figura 4.6.1.

O dispositivo continuou a apresentar resultados bem similares aos apresentados em [2], com a porta OR que apresenta um valor para a Transmissão, $T > 0,5$, na presença do nível lógico alto, aproximadamente igual a 0,6 para os casos (1 OR 0) e (0 OR 1) e aproximadamente igual a 0,8, para o caso (1 OR 1), bem similar aos resultados de [2], apresentado na Tabela 5.2.

A porta OR, assim como a porta AND, não sofreram alterações no valor do raio de suas hastes e da constante da rede, bem como nos guias de onda e nos anéis ressonantes, apresentam um raio de 0,1 μm e, uma constante da rede de 0,54 μm . Na Figura 3.5 é apresentado a distribuição espacial do campo elétrico nas portas AND e OR, com o dispositivo em operação.

Tabela 5.2 - Tabela Verdade Para a Porta Lógica OR, indicada na Figura 4.6.2, com os resultados alcançados para a Transmissão na sua estrutura.

A	B	Saída Lógica	$T = \left \frac{E_{out}}{E_{in}} \right ^2$
0	0	0	0
0	1	1	$> 0,5$
1	0	1	$> 0,5$
1	1	1	$> 0,5$

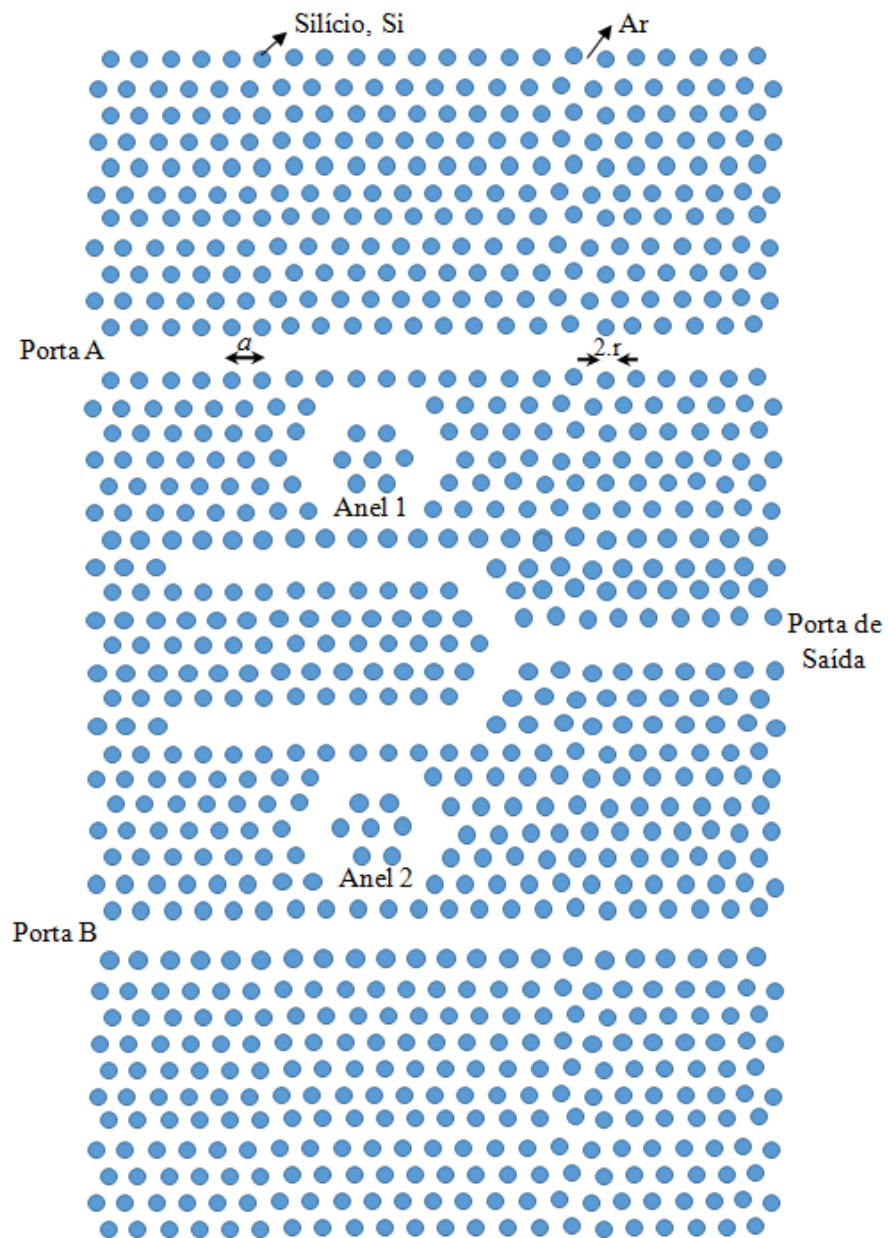


Figura 5.2 - Porta OR implementadas com anéis ressonantes, e com dimensões otimizadas.

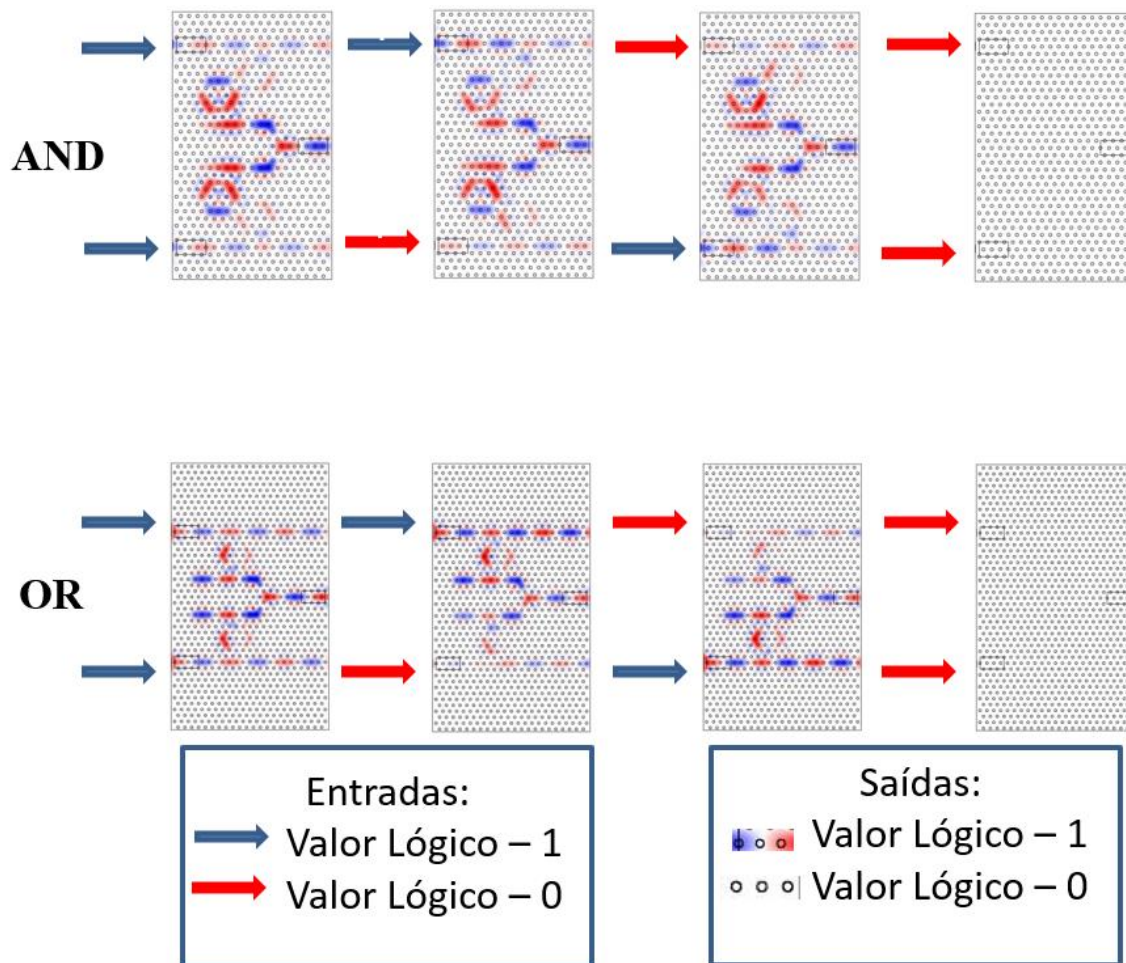


Figura 5.3 - Distribuição espacial do campo na porta lógica representando a operação lógica AND e OR.

6 ANÁLISE DA TOLERÂNCIA AO ERRO NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO E OPERAÇÃO DO DISPOSITIVO IMPLEMENTADO COM A COMBINAÇÃO DE DOIS MMIS

6.1 Introdução

Os resultados apresentados para o dispositivo citado no Capítulo 3, Seção 3.4, foram analisados em quatro situações distintas, quando ocorreu para uma variação no raio das hastes, para uma variação no índice de refração do Silício, no índice de refração da Sílica e nos dois índices simultaneamente, foi indicado a presença do nível lógico alto em três casos e do nível lógico baixo em um único caso, os testes foram realizados para o comprimento de onda de 1,55 μm .

6.2 A análise da tolerância ao erro no processo de fabricação e operação do dispositivo implementado com a combinação de dois MMIs

A primeira análise se refere a uma variação nas dimensões do raio, que sofreu um aumento e uma redução do seu valor em $\pm 10\%$, pois é uma variação percentual que costuma ocorrer entre o seu design computacional e a etapa de fabricação [1].

A segunda análise retrata uma alteração no índice de refração do Silício, que está presente nas hastes do dispositivo, nele foi feita uma alteração no seu índice de refração para os valores de 3,44, 3,55 e 3,66, pois são valores que o índice de refração do Si costuma apresentar.

O terceiro caso ilustra o comportamento do dispositivo no momento em que foi alterado o valor do índice de refração da Sílica, para os valores de 1,44, 1,55 e 1,66 e, os outros valores são índices que a Sílica, quando dopada com outros materiais, pode apresentar.

A quarta situação apresenta os resultados para o caso em que alterou-se o índice de refração das hastes, para os valores de 3,44, 3,55 e 3,66, juntamente com o índice do substrato, que assumiu os valores de 1,44, 1,55 e 1,66.

6.3 Sinal com fase 180° nas portas A, B, C e D

6.3.1 Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento e uma redução de 10% do valor raio

Detectou-se na Figura 6.3.1, para alterações no valor do raio das hastes de Silício do dispositivo, que nas três situações o dispositivo continua a apresentar o nível lógico alto na porta F de saída, com o campo elétrico na saída que indica um valor maior ou igual a 1,0 V/m.

Quando ocorre um aumento de 10% do valor do raio, o campo apresenta uma queda mais intensa, corresponde ao valor de 1,0 V/m, quando o raio passa por uma redução de 10% do seu valor original, a queda é menos intensa, com o campo correspondendo a aproximadamente 1,7 V/m.

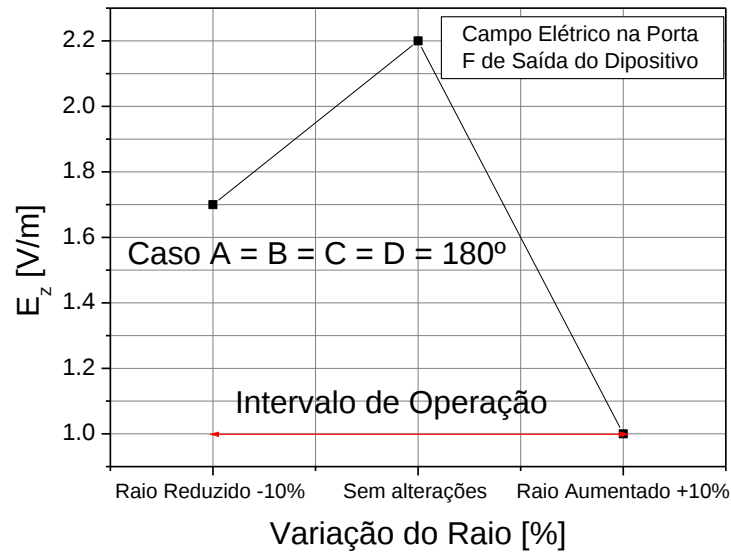


Figura 6.3.1 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de $1,55\mu\text{m}$, dependendo da fase relativa dos campos nas portas A, B, C e D correspondem a 180° , reduziu-se e aumentou-se o tamanho do raio das hastes em até 10%.

6.3.2 Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração das hastes

A configuração de fases desta seção para as portas de entrada permitiu constatar que o valor do campo para a porta de saída F do dispositivo, quando o índice de refração varia para 3,44, 3,55 e 3,66, respectivamente, ocorreu uma queda abrupta do valor de $|E_z|$, ilustrado na Figura 6.3.2, quando o dispositivo não passou por alterações, o valor do campo elétrico corresponde a aproximadamente 2,2 V/m, posteriormente passa a valer 1,2 V/m, 0,9 V/m e 0,7 V/m, respectivamente, para os três casos em que alterou-se o valor do índice de refração do Silício, sendo que nestes dois últimos casos não foi possível detectar a presença do nível lógico alto, por meio da intensidade do valor de $|E_z|$.

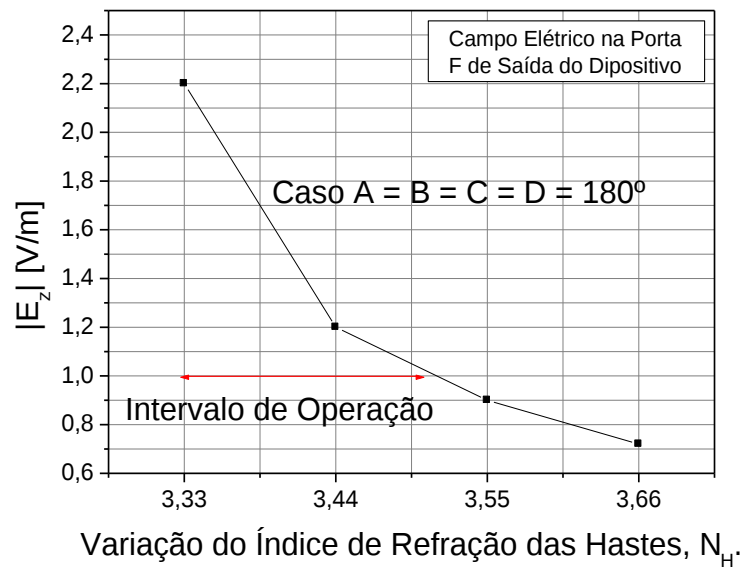


Figura 6.3.2 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de $1,55 \mu\text{m}$, quando a fase relativa dos campos nas portas A, B, C e D correspondem a 180° , variou-se o índice de refração das hastes para 3,44, 3,55 e 3,66, respectivamente.

6.3.3 Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração do substrato

O aumento do índice de refração do substrato, permitiu detectar o valor do campo para a porta de saída F do dispositivo, quando o índice de refração varia para 1,44, 1,55 e 1,66, assim como no caso apresentado na seção anterior, houve uma queda abrupta do valor do campo elétrico na porta de saída do dispositivo, representado na Figura 6.3.3.

O campo elétrico inicialmente correspondeu ao valor de aproximadamente 2,2 V/m, quando o índice de refração correspondeu a 1,44, o campo passa a valer aproximadamente 0,1 V/m, no momento que o índice de refração do Substrato correspondeu a 1,55 e 1,66, em ambos os casos o campo sofreu um leve aumento para 0,2 V/m, além de que nestes três casos o campo elétrico apresentou uma baixa intensidade.

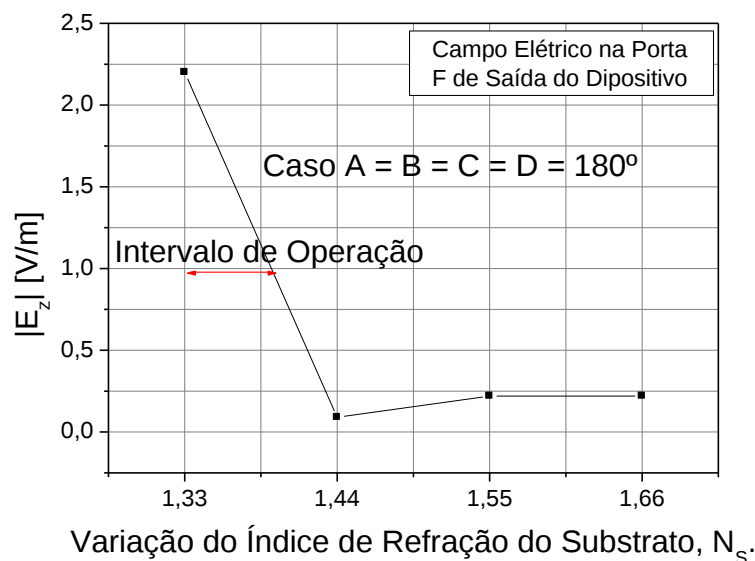


Figura 6.3.3 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de $1,55 \mu\text{m}$, quando a fase relativa dos campos nas portas A, B, C e D correspondem a 180° , variou-se o índice de refração do substrato para 1,44, 1,55 e 1,66.

6.3.4 Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração das hastes e do substrato

No primeiro caso o índice das hastes e do substrato correspondiam a 3,44 e 1,44, respectivamente, no segundo caso com índice das hastes e do substrato equivaliam a 3,55 e 1,55, respectivamente e, o terceiro caso com índice das hastes e do substrato foram ajustados para a 3,66 e 1,66, respectivamente, os resultados são bem similares aos resultados apresentados na seção anterior.

Quando o índice do substrato sofreu alterações no seu valor padrão, novamente sofreu uma queda acentuada, partiu de 2,2 V/m, caso inicial em que não ocorrem alterações na estrutura original, para aproximadamente 0,05 V/m.

O índice de refração das hastes e do substrato quando correspondem a 3,44 e 1,44, respectivamente e, variam para 3,55 e 1,55, respectivamente, foi possível constatar que o valor do campo apresenta um leve aumento para 0,01 V/m, apresentado na Figura 6.3.4, no último caso, quando os índices correspondem a 3,66 e 1,66, respectivamente, ocorreu um novo aumento do valor do campo elétrico, para aproximadamente 0,25 V/m, assim como na seção anterior, nestes três casos de mudança nos parâmetros originais, o campo elétrico na saída apresenta um perfil de baixa intensidade.

Constatou-se que outras combinações entre índice das hastes e do substrato, para este dispositivo, irão trazer resultados similares, assim como ocorreu entre os dois últimos casos analisados.

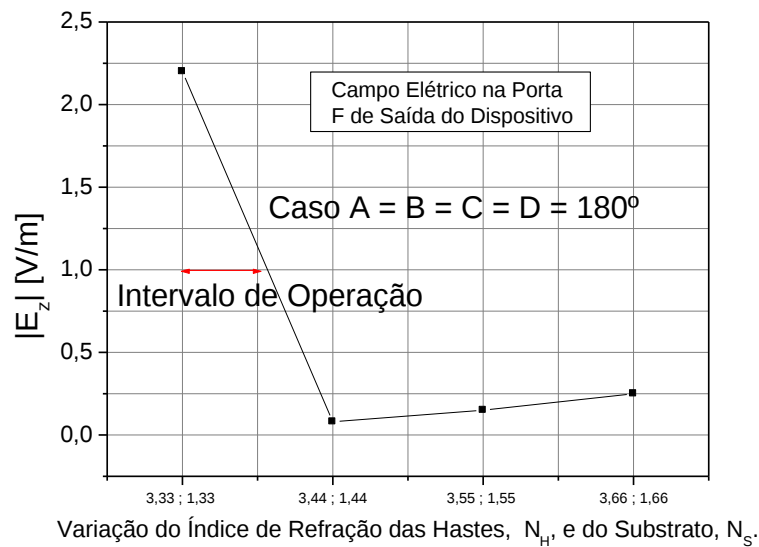


Figura 6.3.4 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de $1,55\mu\text{m}$, quando a fase relativa dos campos nas portas A, B, C e D correspondem a 180° , variou-se o índice de refração das hastes para 3,44, 3,55 e 3,66 e do substrato para 1,44, 1,55 e 1,66.

6.4 Sinal com fase 0° nas portas A e D e sinal com fase 180° nas portas B e C

6.4.1 Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento e uma redução de 10% do valor raio

A Figura 6.4.1 apresenta os resultados obtidos quando foi feita a mudança no valor do raio das hastes de Silício da estrutura, os dois casos em que há alterações nos padrões originais, fornecidos pela referência [3], os resultados continuam a indicar o nível lógico baixo, detectado quando o campo elétrico apresentado na Porta F de saída apresenta um valor menor do que $1,0\text{ V/m}$.

É importante ressaltar que para esta configuração das fases nas portas de entrada, os resultados alcançados diferem da subseção 6.3.1, pois $|E_z|$ apresenta um valor menor, para os três casos em que houve alterações nos valores padrões de N_H e N_S .

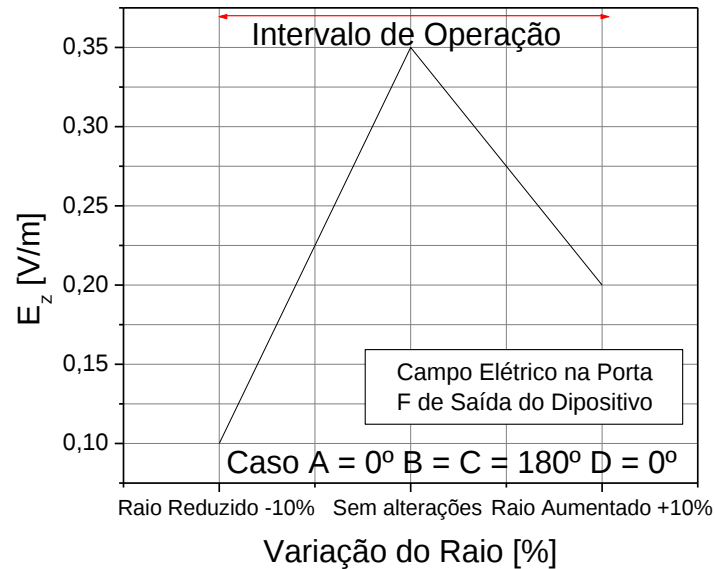


Figura 6.4.1 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de $1,55\mu\text{m}$, quando a fase relativa dos campos nas portas A e D correspondem a 0° e, nas portas B e C correspondem a 180° , reduziu-se e aumentou-se o tamanho do raio das hastes em até 10%.

6.4.2 Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração das hastes

A configuração de fases desta seção para as portas de entrada permitiu constatar que o valor do Campo para a porta de saída F do dispositivo, quando o índice de refração varia para 3,44, 3,55 e 3,66, respectivamente, ocorre uma queda abrupta do valor de $|E_z|$, ilustrado na Figura 6.4.2, quando o dispositivo não sofre alterações, o valor do campo elétrico corresponde a aproximadamente 2,2 V/m e, passa a valer 1,2 V/m, 0,9 V/m e 0,7 V/m, respectivamente para os três casos em que alterou-se o valor do índice de refração do Silício, sendo que nestes dois últimos casos não foi possível detectar a presença do nível lógico alto, por meio da intensidade do valor de $|E_z|$.

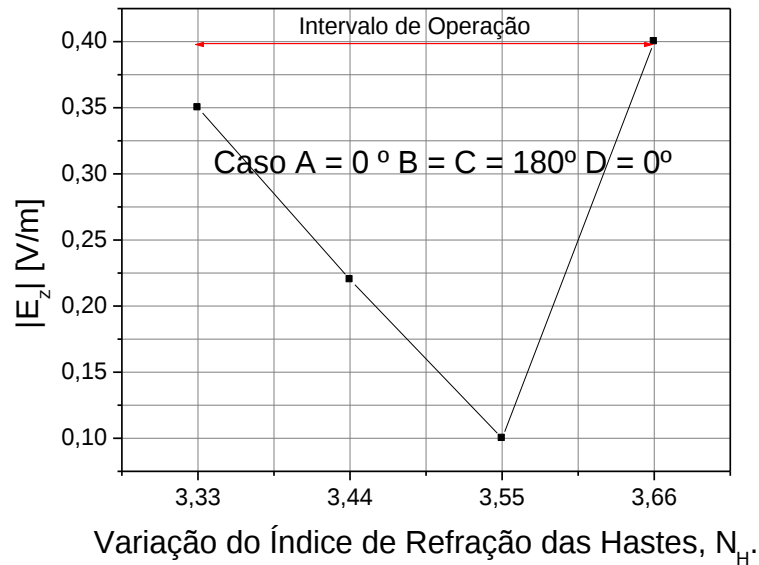


Figura 6.4.2 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de $1,55\mu\text{m}$, quando a fase relativa dos campos nas portas A e D correspondem a 0° e, nas portas B e C correspondem a 180° , variou-se o índice de refração das hastes para 3,44, 3,55 e 3,66.

6.4.3 Análise do comportamento do dispositivo quando ocorre um aumento do índice do substrato

A Figura 6.4.3 ilustra o comportamento do campo elétrico, E_z , na porta de saída F, para a mesma configuração das fases dos sinais de entrada das portas A, B, C e D indicados nesta subseção, para variações no índice de refração do substrato presente neste dispositivo, foram inseridos os valores de 1,44, 1,55 e 1,66, sendo possível detectar uma queda acentuada do valor do campo elétrico na porta de saída citada.

Verificou-se para quando não ocorrem alterações, $|E_z|$ corresponde a aproximadamente 0,35 V/m e, quando o índice de refração do substrato corresponde a 1,44, $|E_z|$ passa a valer aproximadamente 0,09 V/m, quando o mesmo índice de refração corresponde a 1,55 e posteriormente a 1,66, o valor de $|E_z|$ cresce e passa a valer aproximadamente 0,22 V/m e 0,25 V/m, respectivamente.

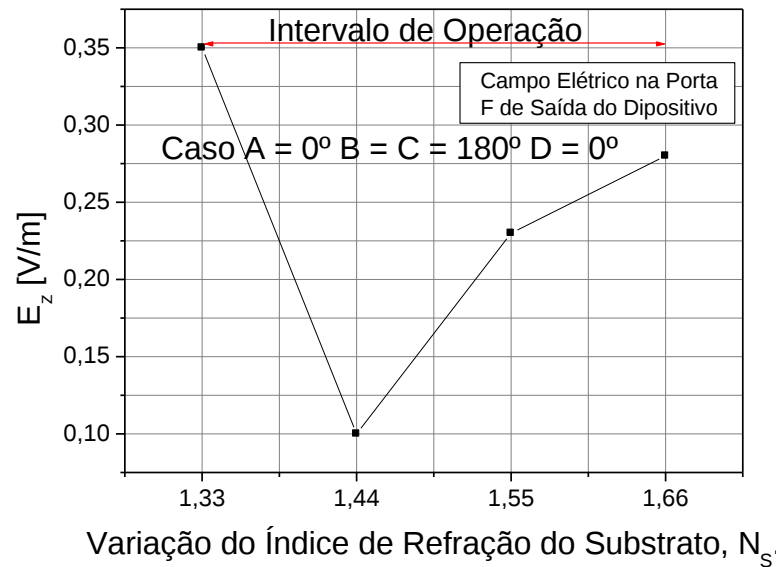


Figura 6.4.3 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de 1,55 μm , dependendo da fase relativa dos campos nas portas A e D correspondem a 0° e, nas portas B e C correspondem a 180° , variou-se o índice de refração do substrato para 1,44, 1,55 e 1,66.

6.4.4 Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração das hastes e do substrato

A Figura 6.4.4 retrata a variação do campo elétrico, na porta de saída F do dispositivo abordado neste capítulo, para a mesma configuração das fases dos sinais de entrada das portas A, B, C e D indicados nesta subseção, com as variações no índice de refração do Silício para 3,44, 3,55 e 3,66 e, da Sílica para os valores de 1,44, 1,55 e 1,66, constatou-se uma queda acentuada do valor do campo elétrico na Porta F, com os parâmetros originais do projeto apresentado em [3], $|E_z|$ corresponde a aproximadamente 0,35 V/m.

O índice de refração das hastes corresponde a 1,44 e o do substrato corresponde a 3,44, $|E_z|$ vale aproximadamente 0,10 V/m, posteriormente, os mesmos índices de refração correspondem a 1,55 e 3,55, em seguida para 1,66 e 3,66, respectivamente para as hastes e para o substrato, o segundo e terceiro casos analisados, o valor de $|E_z|$ cresce, passa a valer aproximadamente 0,23 V/m e 0,28 V/m, respectivamente, indica a presença de resultados bem semelhantes aos que foram apresentados na seção anterior.

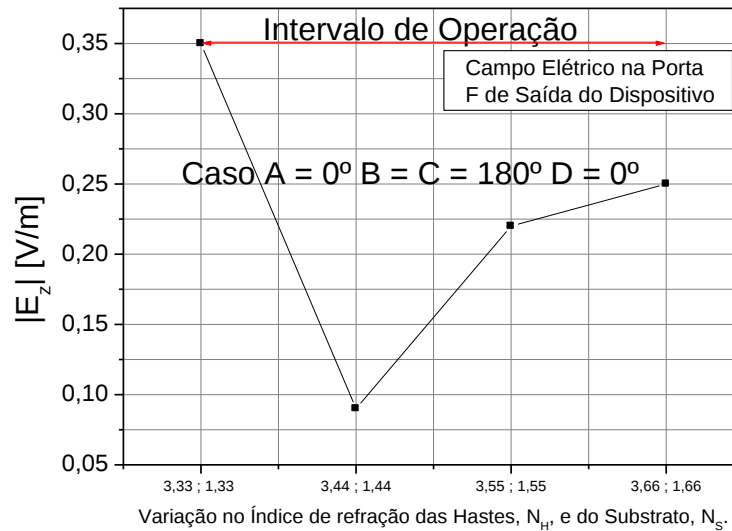


Figura 6.4.4 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de 1,55 μm , dependendo da fase relativa dos campos nas portas A e D correspondem a 0° e, nas portas B e C correspondem a 180° , variou-se o índice de refração das hastes para 3,44, 3,55 e 3,66 e do substrato para 1,44, 1,55 e 1,66.

6.5 Sinal com fase 0° na porta A e sinal com fase 180° nas portas B, C e D

6.5.1 Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento e uma redução de 10% do valor raio

A Figura 6.5.1 sintetiza os resultados alcançados, por meio da mudança no valor do raio das hastes do dispositivo abordado nesta seção, as duas mudanças feitas no raio permitiram que fossem alcançados resultados que indicam a presença do valor lógico 1,0 em quase todo o intervalo, quando apresenta o valor do campo elétrico maior do que 1,0 V/m na Porta F, apenas quando o raio sofre um aumento de 10% no seu valor padrão, $|E_z|$ na saída do dispositivo apresenta amplitude inferior a 1,0 V/m, corresponde ao valor de 0,9 V/m, mas caracteriza a presença do nível lógico alto, por estar dentro da margem de 10%.

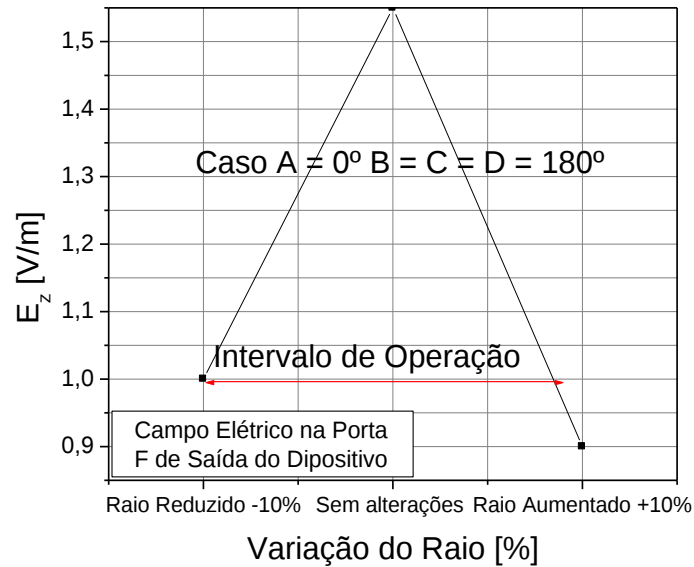


Figura 6.5.1 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de $1,55 \mu\text{m}$, quando a fase relativa dos campos nas portas A corresponde a 0° e nas portas B, C e D correspondem a 180° , reduziu-se e aumentou-se o tamanho do raio das hastes em até 10%.

6.5.2 Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração das hastes

A Figura 6.5.2 que indica a intensidade do campo elétrico, na porta de saída F, para a mesma configuração das fases dos sinais de entrada das portas A, B, C e D, indicadas nesta subseção, para variações no índice de refração do Silício presente no mesmo dispositivo abordado neste capítulo, o índice de refração citado nesta subseção varia para 3,44, 3,55 e 3,66, os resultados indicam a presença de uma queda significativa do valor de $|E_z|$, ela ocorre no momento que o índice de refração aumenta para 3,44, salta de $1,55 \text{ V/m}$ para $1,1 \text{ V/m}$.

O índice de refração varia posteriormente para 3,55, mas o valor do campo elétrico permanece o mesmo, novamente ocorre um crescimento do valor do índice de refração citado, para 3,66, com isto, o campo sofre uma nova queda para $0,85 \text{ V/m}$, o qual, se apresenta inferior a $1,0 \text{ V/m}$, caracteriza a presença do nível lógico baixo e a saída do intervalo útil de operação deste dispositivo, para a configuração de parâmetros citados.

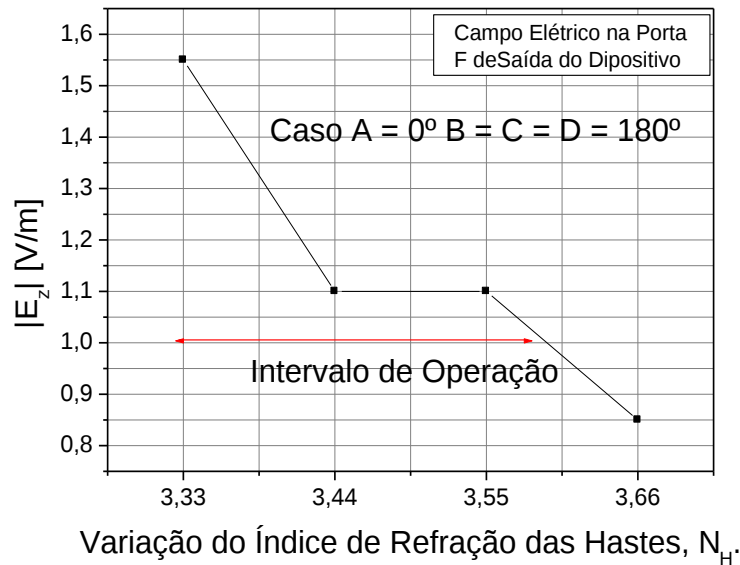


Figura 6.5.2 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de $1,55\mu\text{m}$, para a fase relativa dos campos na porta A correspondem a 0° e nas portas B, C e D correspondem a 180° , variou-se o índice de refração das hastes para 3,44, 3,55 e 3,66.

6.5.3 Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração do substrato

A Figura 6.5.3 permitiu averiguar o comportamento do campo elétrico, na porta de saída F, para a mesma configuração das fases dos sinais de entrada das portas A, B, C e D, abordados nesta subseção, as alterações no índice de refração do substrato presente neste dispositivo, em que foram inseridos os mesmos valores já citados, foi possível detectar uma queda significativa do valor do campo elétrico na porta F, para os parâmetros originais fornecidos em [3], $|E_z|$ correspondeu aproximadamente 0,2 V/m a 0,30 V/m para os dois primeiros casos analisados, respectivamente.

O índice de refração do substrato quando corresponde a 1,55, $|E_z|$ apresentou uma queda acentuada, passou a valer aproximadamente 0,10 V/m e após a segunda alteração no índice de refração, o valor de $|E_z|$ cresceu levemente e assumiu os valores de aproximadamente 0,22 V/m e 0,28 V/m, respectivamente.

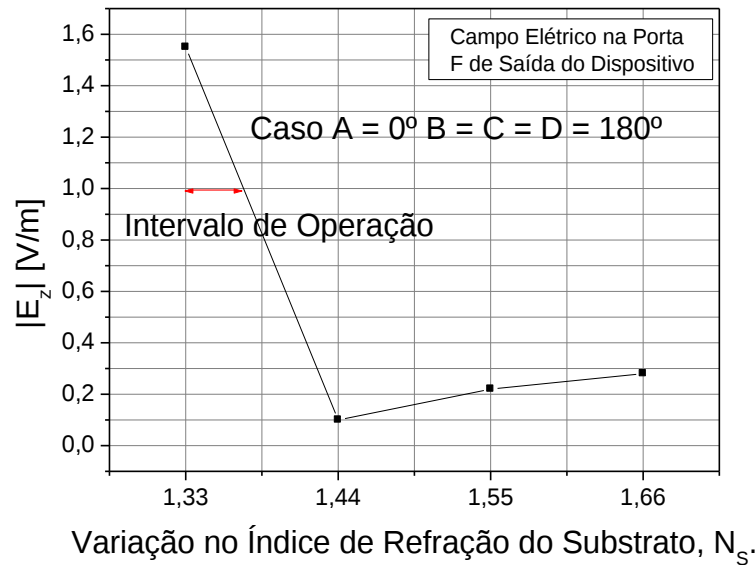


Figura 6.5.3 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de $1,55\mu\text{m}$, para a fase relativa dos campos na porta A correspondem a 0° e nas portas B, C e D correspondem a 180° , variou-se o índice de refração do substrato para 1,44, 1,55 e 1,66.

6.5.4 Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração das hastes e do substrato

Na Figura 6.5.4 foi apresentado o campo elétrico, $|E_z|$, na porta de saída F e, para as fases dos sinais de entrada das portas A, B, C e D citadas na mesma figura, com as variações no índice de refração das hastes para os mesmos valores presentes nas subseções 6.5.2 e 6.5.3, nas quais foram averiguados uma queda proporcional a que ocorreu na subseção anterior, no valor de $|E_z|$ na Porta F para os parâmetros iniciais, $|E_z|$ vale a aproximadamente 1,55 V/m.

Constatou-se, conforme o índice de refração das hastes e do substrato passaram a corresponder a 3,44 e 1,44, respectivamente, $|E_z|$ assumiu o valor de 0,10 V/m, no momento que os mesmos índices de refração correspondiam a 1,55 e 3,55 e, posteriormente para 1,66 e 3,66, respectivamente, para o Silício e a Sílica, o campo elétrico apresentou um leve aumento, como na subseção anterior, alcançou os valores de aproximadamente 0,20 V/m e 0,30 V/m, respectivamente, que indicam a presença do nível lógico baixo nos três casos analisados, para mudanças nos parâmetros nos índices de refração, novamente o dispositivo volta a ter resultados bem similares aos que foram na seção 6.4.4.

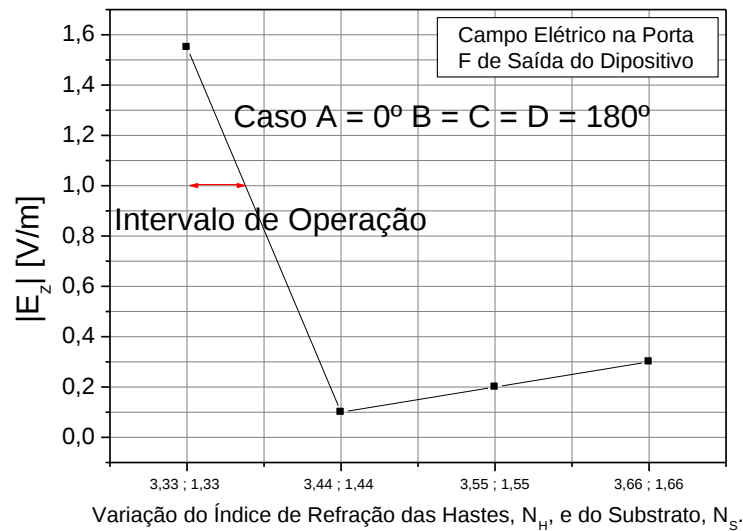


Figura 6.5.4 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de $1,55\mu\text{m}$, para a fase relativa dos campos na porta A corresponde a 0° e nas portas B, C e D correspondem a 180° , variou-se o índice de refração das hastes para 3,44, 3,55 e 3,66 e do substrato para 1,44, 1,55 e 1,66.

6.6 Sinal com fase 0° na porta D e sinal com fase 180° nas portas A, B e C

6.6.1 Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento e uma redução de 10% do valor raio

A Figura 6.6.1 concentra os resultados obtidos por meio de alterações no valor do raio das hastes do dispositivo, abordado nesta subseção, com as mesmas modificações já citadas nas subseções 6.3.1, 6.4.1 e 6.5.1, por meio de simulações realizadas para estes novos parâmetros, foi possível visualizar a presença do valor lógico 1, para todos os resultados quando o raio passou por um aumento de 10% no seu valor inicial, o campo elétrico apresentou um valor levemente inferior a $1,0\text{ V/m}$ na Porta F, mas indica a presença do nível lógico alto, por estar localizando na margem de erro de $\pm 10\%$.

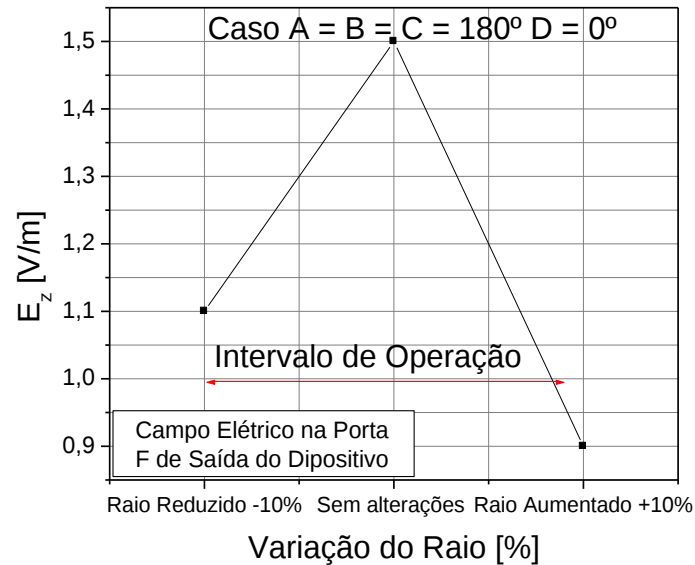


Figura 6.6.1 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de $1,55\mu\text{m}$, quando a fase relativa dos campos nas portas A, B e C correspondem a 180° e, D corresponde a 0° , reduziu-se e aumentou-se o tamanho do raio das hastes em até 10%.

6.6.2 Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração das hastes

A Figura 6.6.2 permitiu analisar a intensidade do campo elétrico na porta de saída F, a configuração das fases dos sinais de entrada das portas A, B, C e D indicados nesta seção, com as mesmas alterações no índice de refração das hastes presentes no dispositivo, nas quais os resultados que emergiram perante simulações para este caso e indicaram a presença de uma queda do valor do campo elétrico de saída da estrutura, no instante que o índice de refração sobe para 3,44, ocorreu uma leve queda no valor de E_z , de $1,5\text{ V/m}$ para $1,4\text{ V/m}$.

A outra simulação que foi feita para o índice de refração, que varia para 3,55 e posteriormente para 3,66, o valor do campo passou por uma queda mais abrupta, assumiu o valor de $1,0\text{ V/m}$ e no próximo caso ocorreu uma nova queda menos intensa, o campo passou a valer $0,90\text{ V/m}$, o que já caracteriza a indicação do nível lógico baixo e a saída do intervalo útil de operação deste dispositivo.

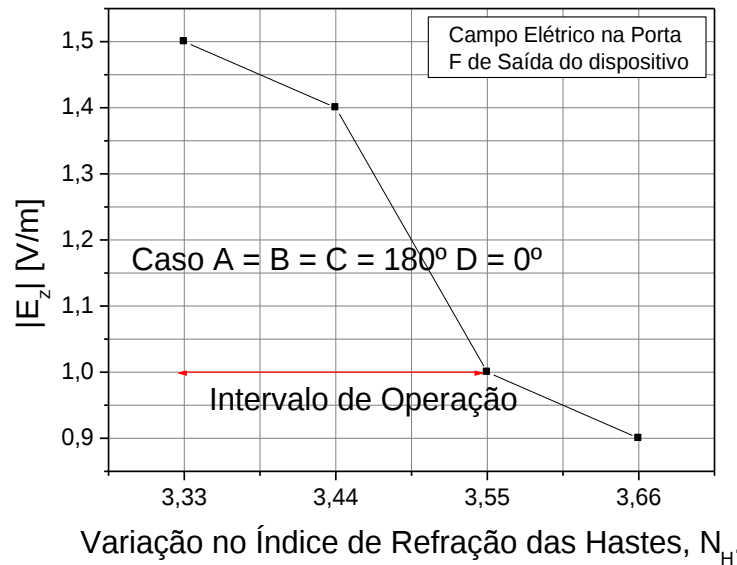


Figura 6.6.2 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de $1,55\mu\text{m}$, para a fase relativa dos campos nas portas A, B e C correspondem a 180° e D corresponde a 0° , variou-se o índice de refração do Sílício para 3,44, 3,55 e 3,66.

6.6.3 Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração do substrato

A Figura 6.6.3 permitiu checar o funcionamento do campo elétrico na porta de saída F, para as mesmas fases dos sinais das portas desta subseção, foram inseridos os mesmos valores para o índice de refração da Sílica, sendo possível visualizar uma redução significativa no valor do campo elétrico na porta de saída do dispositivo, $|E_z|$ correspondeu a aproximadamente 0,10 V/m, para o N_H correspondente a 3,55 ou 3,66, quando comparado com os valores originais fornecidos em [3], N_H e N_S correspondentes a 3,33 e 1,33, respectivamente.

O índice de refração da Sílica quando corresponde a 1,55, faz com que $|E_z|$ passe por um leve aumento e assumiu o valor de 0,2 V/m, com um novo aumento no índice de refração do substrato, para 1,66, $|E_z|$ cresce novamente, para o valor de aproximadamente 0,30 V/m.

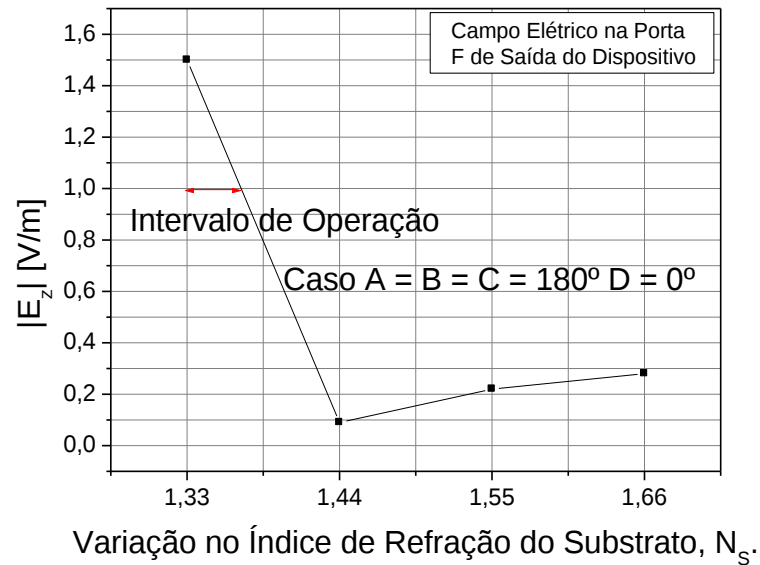


Figura 6.6.3 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de $1,55\mu\text{m}$, para a fase relativa dos campos nas portas A, B e C correspondem a 180° e, D corresponde a 0° , variou-se o índice de refração do substrato para 1,44, 1,55 e 1,66.

6.6.4 Análise do comportamento do dispositivo quando ocorreu um aumento do índice de refração das hastes e do substrato

Na Figura 6.6.4 foi possível observar o campo elétrico na porta de saída F, com as fases dos sinais de entrada das portas A, B, C e D citadas nesta subseção, as variações no índice de refração do Silício e da Sílica para os mesmos valores presentes nas subseções 6.6.2 e 6.6.3, nas quais foi apurado uma queda bem intensa no valor de $|E_z|$, para o primeiro caso, o índice das hastes e do substrato correspondiam a 3,44 e 1,44, respectivamente, o campo valia a aproximadamente 0,01 V/m, mas conforme os índices de refração passam a corresponder a 3,55 e 1,55, respectivamente, $|E_z|$ assume o valor de 0,20 V/m, caracterizado por uma baixa amplitude.

Os mesmos índices de refração quando correspondem a 1,66 e 3,66, $|E_z|$ passa por outro leve aumento, alcança o valor aproximado de 0,30 V/m, aponta a presença do nível lógico baixo nos três casos analisados de mudanças nos parâmetros nos índices de refração das hastes e do substrato, novamente volta a ter resultados bem similares aos que foram na seção 6.5.4.

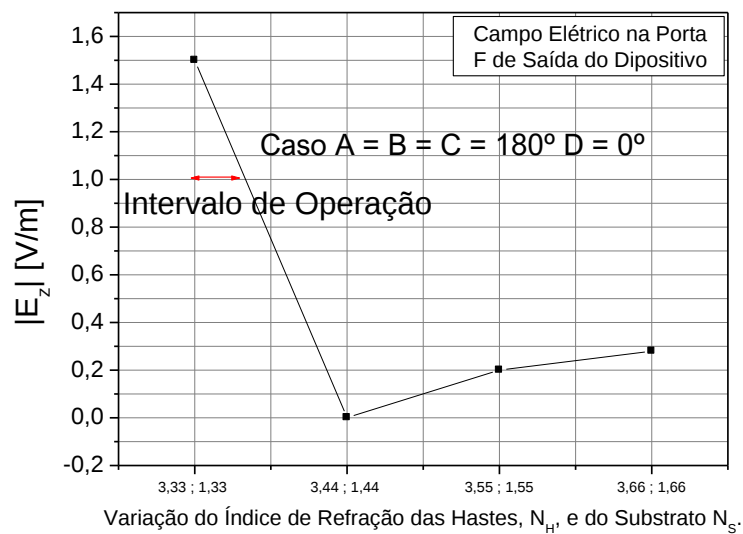


Figura 6.6.4 - Campo elétrico presente na porta de saída quando o comprimento de onda é de $1,55\mu\text{m}$, para a fase relativa dos campos nas portas A, B e C correspondem a 180° e, na porta D correspondem a 0° variou-se o índice de refração das hastes para 3,44, 3,55 e 3,66 e do substrato para 1,44, 1,55 e 1,66.

7 ANÁLISE DE CIRCUITOS LÓGICOS COMPLEXOS

7.1 Introdução

Os circuitos lógicos, *CLs*, são componentes eletrônicos ou eletro-ópticos, os quais operam por meio do agrupamento de diferentes operações binárias ou booleanas OR, AND, NOT, XOR, XNOR e NAND , [26].

Os circuitos lógicos são capazes de realizarem combinações com as diversas operações citadas no parágrafo anterior, utilizam como sinais de entrada tensão e corrente elétrica, campo elétrico ou magnético e outras grandezas físicas.

Os sinais citados no parágrafo anterior são aplicados aos pinos, portas ou *gates* de entrada e que capazes de identificar o nível lógico destes sinais, 0 ou 1. Os *CLs* são capazes de gerar um único sinal na saída do dispositivo, por meio da combinação de diferentes sinais de entrada, transmiti-los ao longo de sua estrutura e enviá-los até o pino, porta ou *gate* de saída, que indica a presença do nível lógico alto ou baixo, 0 ou 1, [27].

Os parâmetros básicos deste dispositivo para a realização das simulações apresentadas neste capítulo foram o comprimento de onda, a constante da rede, o raio das hastes o índice de refração do Silício e da Sílica, correspondem a 1,55 μm , 0,55 μm , 0,11 μm , 3,33 e 1,33, respectivamente [3]. As configurações das fases dos sinais nas portas de entrada A, B, C e D, obedecem a tabela 7.1.

7.2 Os quatro diferentes casos para a distribuição espacial do campo eletromagnético no *CL*.

7.2.1 A tabela verdade do circuito lógico composto por uma combinação de MMIs

A Tabela 7.1 ilustra o comportamento do circuito lógico apresentado, para todas as diferentes combinações entre os níveis lógicos apresentados nas portas de entrada A, B, C, e D, com o nível lógico alto sendo representado para um sinal com fase 180° e o nível lógico baixo por um sinal com fase 0° e com a porta F como porta de saída do dispositivo, com os níveis lógicos alto e baixo medidos por meio da intensidade do sinal.

Tabela 7.1: Tabela Verdade o dispositivo composto com uma combinação de MMIs

A	B	C	D	F
0	0	0	0	1
0	0	0	1	1
0	0	1	0	1
0	0	1	1	1
0	1	0	0	1
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
0	1	1	1	1
1	0	0	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	0	1	1	1
1	1	0	0	1
1	1	0	1	0
1	1	1	0	1
1	1	1	1	1

7.2.2 A expressão Booleanana para o circuito lógico

As 16 combinações para as quatro portas de entrada do dispositivo, A, B, C e D, com os sinais com os seus níveis lógicos invertidos, sendo representados por A', B', C' e D', listados na Tabela 7.1 e foram capazes de gerar uma expressão Booleanana para a porta F apresentada a seguir:

$$F = (A' \text{ AND } B') \text{ OR } (A \text{ AND } B \text{ AND } C) \text{ OR } ((A \text{ OR } B) \text{ AND } ((C \text{ AND } D) \text{ OR } (C' \text{ AND } D)))$$

7.2.3 Os 16 diferentes casos para a distribuição espacial do campo eletromagnético no CL

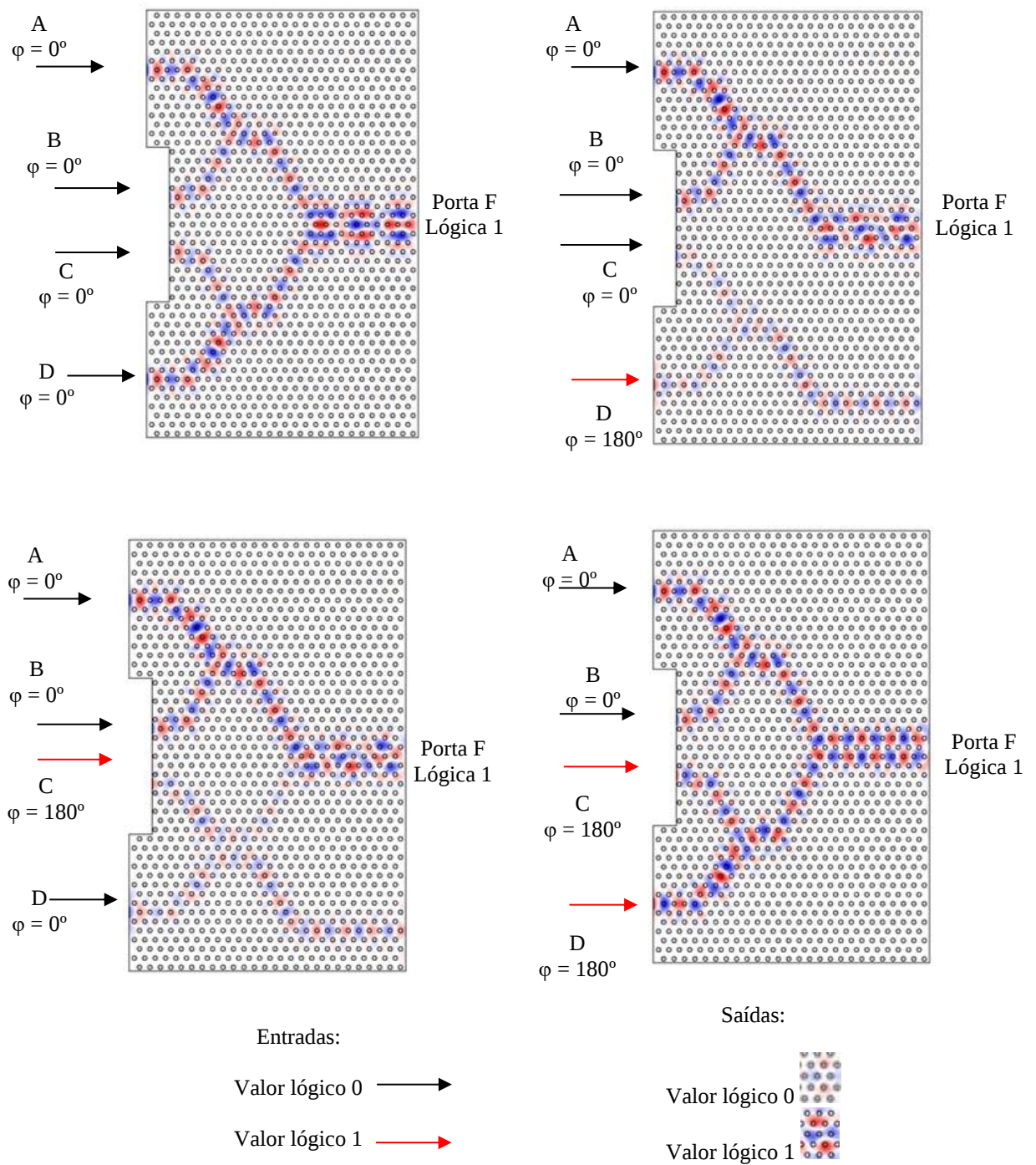


Figura 7.1 - Distribuição espacial do campo, para quatro diferentes casos no circuito lógico projetado por meio da combinação de MMIs.

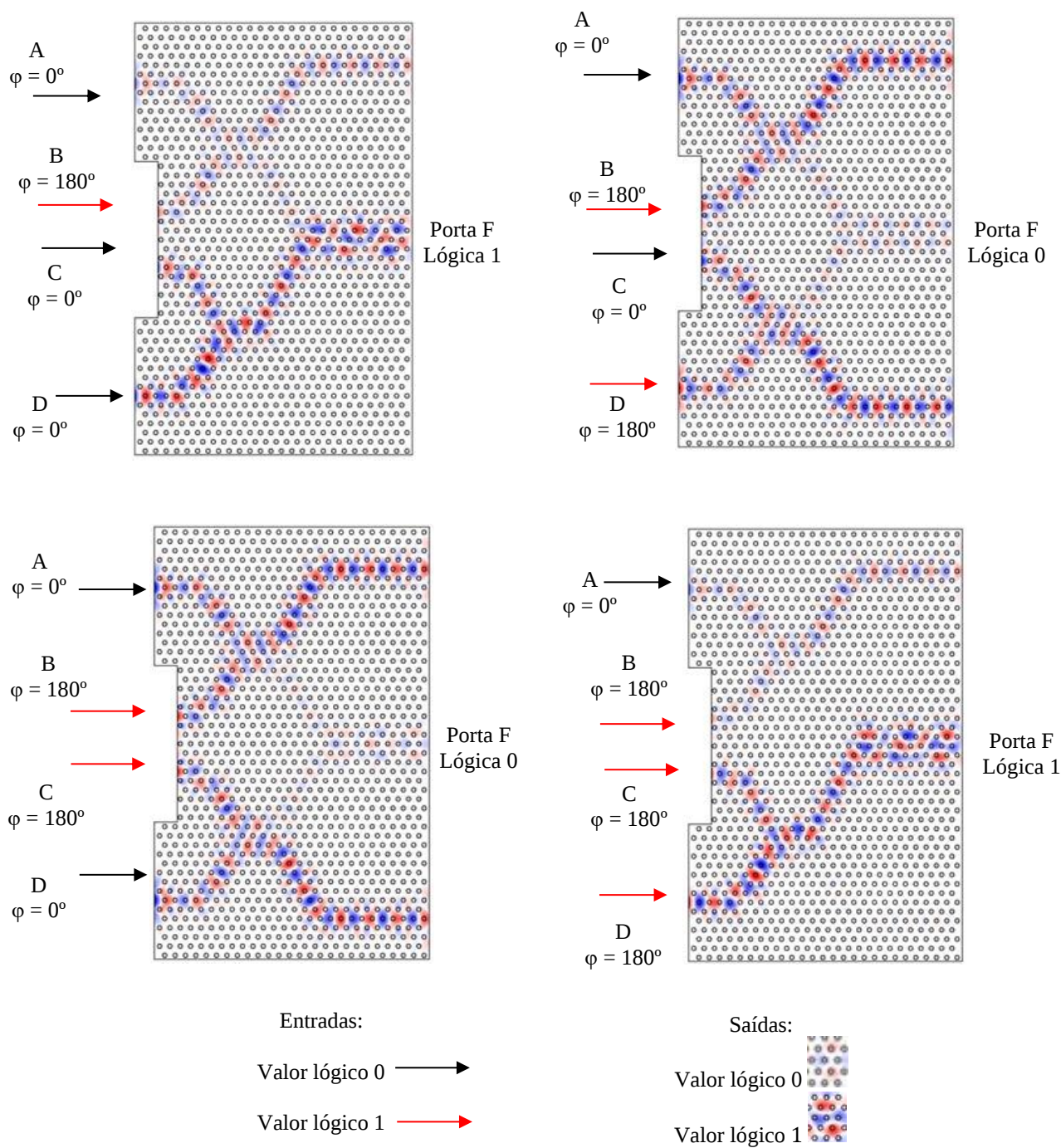


Figura 7.2 - Distribuição espacial do campo, para quatro diferentes casos no circuito lógico projetado por meio da combinação de MMIs.

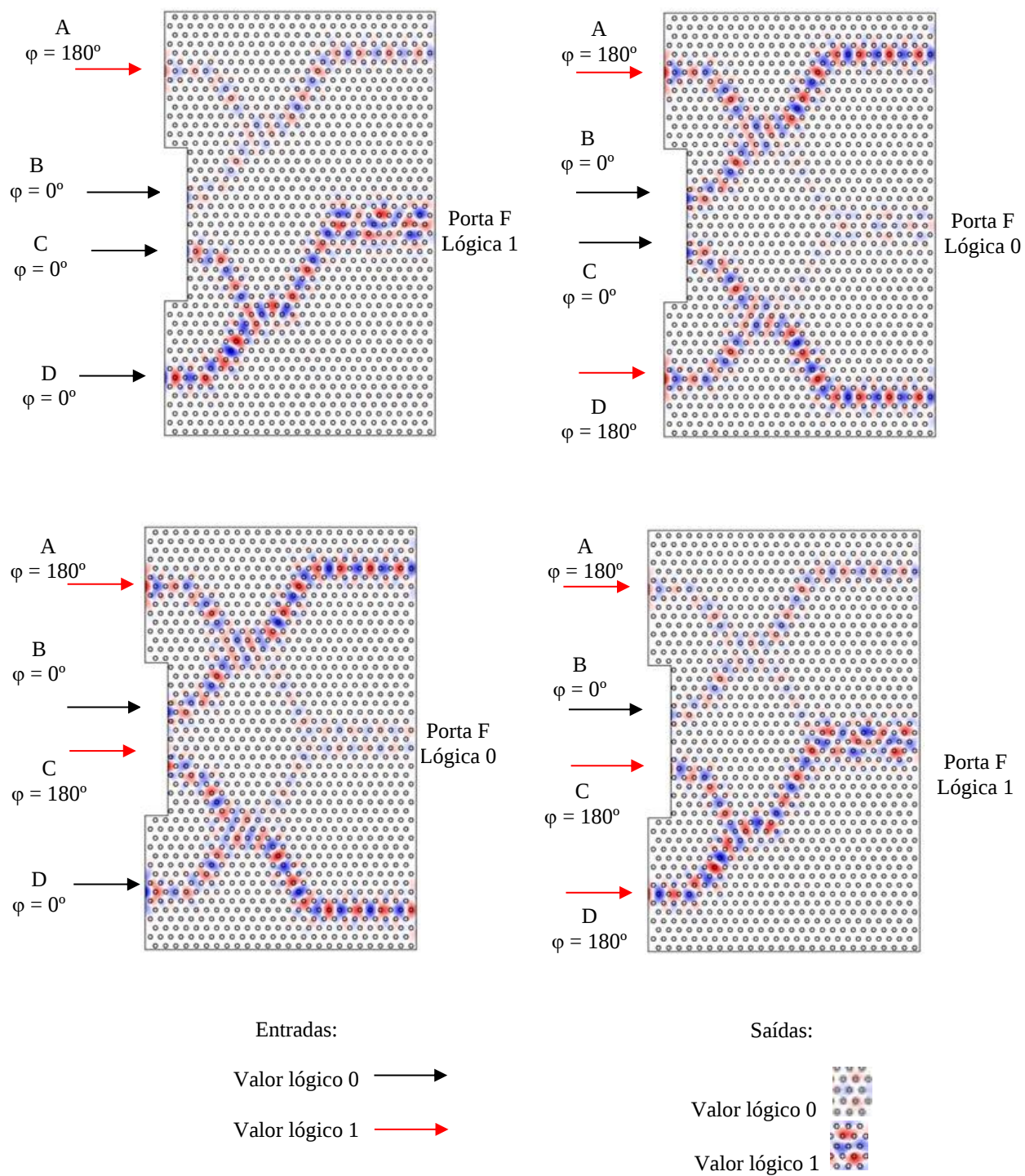


Figura 7.3 - Distribuição espacial do campo, para quatro diferentes casos no circuito lógico projetado por meio da combinação de MMIs.

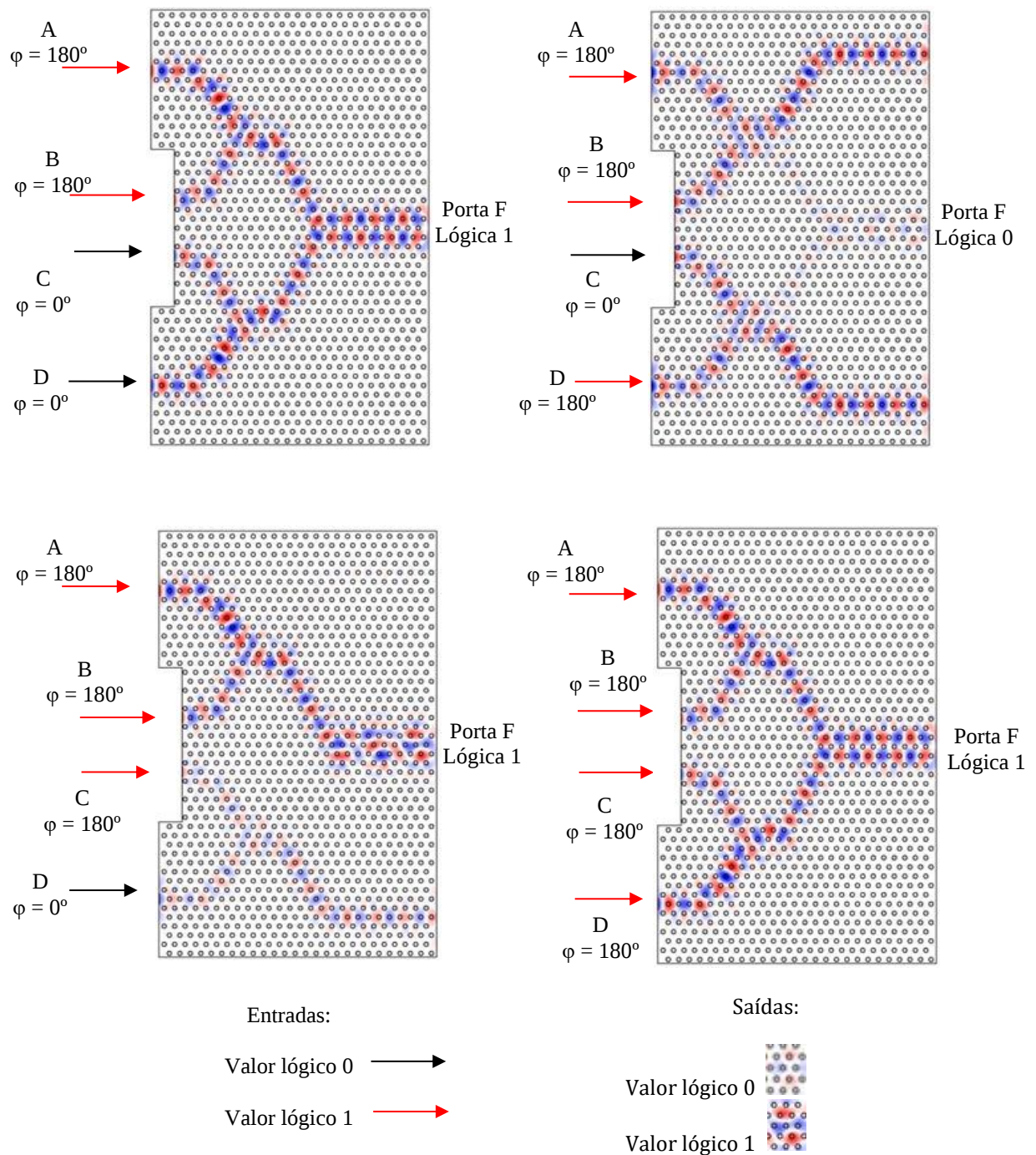


Figura 7.4 - Distribuição espacial do campo, para quatro diferentes casos no circuito lógico projetado por meio da combinação de MMIs.

7.3 Conclusões sobre CL ópticos

Conclui-se sobre os resultados obtidos e apresentados neste capítulo que, já é possível projetar e confeccionar circuitos lógicos totalmente ópticos, os quais são constituídos pelo agrupamento de dispositivos capazes de realizar operações lógicas, como as diversas operações citadas ao longo desta dissertação, que torna estes

dispositivos ferramentas muito importantes e eficazes no ramo eletrônica, eletro-ótica e telecomunicações.

As diversas operações lógicas apresentadas neste capítulo podem ser agrupadas em um único dispositivo, os *CLs*, eles são capazes de implementar dispositivos eletrônicos, ou partes de um dispositivo eletrônico de arquitetura mais complexa, como microcontroladores e microprocessadores, conseqüentemente, com uma capacidade mais elevada de cumprir tarefas mais complexas, a exemplo da realização do reconhecimento, codificação e decodificação de cabeçalhos, criptografia de sinais, processamento de sinais ópticos, dentre outras tarefas [3].

8 CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS

8.1 Conclusões

Neste trabalho foram apresentados diversos dispositivos ópticos, que são capazes de realizar diversas operações lógicas, permitem que estes dispositivos sejam utilizados como portas lógicas digitais e até como um circuito lógico, sendo capazes de realizarem o chaveamento do sinal óptico inserido nos mesmos, que pode ser transmitido por meio dos dispositivos ópticos citados, ou dissipado pelos mesmos dispositivos.

A dissertação aqui apresentada proporcionou o fornecimento de formas e técnicas eficientes, especialmente para a redução nas dimensões dos dispositivos, as quais foram alcançados por meio da análise do comportamento do sinal de saída dos mesmos.

Foram priorizados para o sucesso dos resultados, aspectos como a amplitude, a simetria e a uniformidade do sinal, para haver uma redução nas dimensões do projeto, de forma a existir um bom controle e domínio das variáveis envolvidas no processo de fabricação, para que estes dispositivos sejam projetados e fabricados, de modo a manter o seu estado de funcionamento estável e, sobretudo respeitar as regiões em que é detectada a diferença entre os níveis lógicos alto e baixo.

Inicialmente as portas e circuitos lógicos eram confeccionadas e, em muitos casos ainda são confeccionadas por meio da arquitetura CMOS, que trabalha com circuitos eletroeletrônicos, de forma que futuramente venha a ser viabilizado a integração dos dispositivos totalmente ópticos em pequena, média e até larga escala, para que em um futuro próximo hajam não só pequenos circuitos totalmente ópticos, mas também dispositivos e até equipamentos mais complexos, a exemplo de processadores e até computadores totalmente ópticos.

Constatou-se que a estrutura implementada por meio de um único MMI, apresentado em [1], é possível projetar uma estrutura com hastes elípticas, sendo que a maioria dos trabalhos realizados sobre este assunto haviam sido feitos com hastes cilíndricas [1], [2], [3], [4] e [5]. Verificou-se uma alta tolerância no processo de fabricação e ao erro, da ordem de 10% para o raio do cilindro e para a constante da rede.

O dispositivo apresentado em [2] passou por um processo de redução das suas dimensões, por meio de uma redução no seu número de hastes e constatou-se para ambas as portas que foram implementadas, ser possível reduzir a dimensão de sua abscissa de 21,6 μm para 10,26 μm , corresponde ao número de hastes de 40 para 19 hastes e, a dimensão de sua da sua ordenada de 26,45 μm para 21,6 μm , corresponde ao número de hastes 49 para 40 hastes e, manter os resultados inicialmente apresentados para a relação de contraste e para a razão entre os níveis lógicos alto e baixo.

O dispositivo apresentado em [3] foi submetido a alterações em seu raio e no índice de refração das hastes e do substrato, constatou-se para os três casos de configuração das fases dos sinais inseridos nele, em que foi detectado a presença do nível lógico alto, a variação no valor inicial do raio, quando passa por uma aumento de até 10%, foi possível detectar uma queda significativa no valor do campo elétrico, mas foi detectada a presença do mesmo nível lógico, que corresponde a um valor maior ou igual que 1 V/m, para o nível lógico alto e menor que 1 V/m, para o nível lógico baixo.

No mesmo dispositivo citado no parágrafo anterior, quando o raio das hastes passa por uma redução de 10% em seu valor inicial, ocorreu novamente uma queda no valor do campo elétrico, mas manteve-se superior a 1 V/m para o nível lógico alto e inferior a 1 V/m na presença do nível lógico baixo [25].

O mesmo dispositivo posteriormente passou por uma variação no índice de refração das hastes. Para os três casos de configuração das fases dos sinais inseridos no dispositivo apresentado em [3], foi detectado a presença do nível lógico alto, ocorreu uma redução significativa na intensidade de E_z , nos três casos.

O dispositivo apresentado em [3] permitiu por meio dos resultados obtidos, comprovar a presença de quatro Expressões Booleanas para o seu circuito lógico, analisadas no Capítulo 7, seção 7.2 e, os níveis lógicos representados pelas fases apresentadas na Tabela 7.2.

Os dispositivos [1], [2] e [3] foram analisados e otimizados, manteve-se as suas principais características, como a taxa de transmissão, relação de contraste e a amplitude do sinal de saída, buscou-se manter estes parâmetros com os resultados direcionados para que as dimensões dos dispositivos otimizadas, quando comparado com o projeto original, a finalidade foi reduzir os custos do projeto final e, por meio da obtenção de dispositivos com proporções menores haver uma maior facilidade no processo de integração com outros dispositivos.

Verificou-se que os dispositivos abordados nesta dissertação já são utilizados como pequenos blocos, em um processo de agrupamento em pequena, média e larga escala, sendo capazes de realizarem tarefas como processamento de sinais, codificação, decodificação, reconhecimento cabeçalho, dentre outras operações computacionais [28], [29], [30], logo, estes dispositivos ópticos são capazes de reduzirem significativamente o desperdício de tempo, recursos financeiros, materiais e esforço computacional nas diversas etapas do processo de conversão eletro-óptico.

Conclui-se que o domínio das diversas variáveis envolvidas no processo de fabricação dos variados dispositivos ópticos citados ao longo deste trabalho que, por meio de dimensões otimizadas, é possível otimizar não só o projeto final e reduzir os custos totais do projeto, mas também é possível facilitar a sua integração com um volume maior de dispositivos.

8.2 Trabalhos Futuros

Trabalhos futuros podem ser elaborados por meio de novos dispositivos capazes de operar em ambos os modos de polarização, TM e TE, pois quando as portas de entrada são excitadas com um campo magnético gera um campo elétrico e quando as portas de entrada são excitadas com um campo elétrico, gera um campo magnético, que se propaga por meio do dispositivo óptico, atualmente ainda não existem trabalhos referentes a dispositivos que operam simultaneamente para estes dois casos.

O fato citado no parágrafo anterior tornaria viável a implementação de dispositivos que utilizam os modos TM e TE, a exemplo de dispositivos do segmento de informática, microeletrônica e telecomunicações, até mesmo por meio do uso de técnicas de Otimização, as quais seriam aplicadas nos dispositivos estudados ao longo deste

trabalho, com a finalidade de minimizar certos resultados, a exemplo das dimensões dos dispositivos ou, maximizar certos resultados, como a intensidade do campo elétrico, na presença do nível lógico alto.

Verificou-se que alguns trabalhos já realizados utilizaram a análise da tolerância ao erro, por meio das variáveis do processo de fabricação do dispositivo a , r e λ , [1], [4] e [22], mas ainda não existem trabalhos realizados sobre a análise da tolerância na fase do sinal de entrada, utilizada em [1] e [3].

Constata-se também que este trabalho foi bem direcionado a parte teórica, foram feitas diversas simulações computacionais, mas etapas práticas associadas ao processo de fabricação dos dispositivos tratados durante este curso de mestrado, especialmente pelos elevados custos de qualquer processo de fabricação na engenharia, por demandar recursos como materiais, ferramentas, equipamentos e laboratórios específicos, recursos que o grupo de pesquisa e a universidade não possuem, contribuiriam significativamente para a fixação de todo o conteúdo teórico adquirido.

Analisa-se a construção de uma parceria com outras instituições, que possam oferecer estes recursos para futuramente vir a ser realizado um doutorado no formato sanduiche, de forma a ser realizada esta etapa do trabalho, a elaboração prática do dispositivo em instituições que possuam os recursos materiais necessários.

A teoria de álgebra booleana foi utilizada para realização deste trabalho, entre outros temas, estuda também outros dispositivos, a exemplo de Flip-flops, Multiplexadores e Demultiplexadores.

Conclui-se que a o principal trabalho futuro a ser realizado, consiste na tentativa de implementação prática dos dispositivos estudados ao longo desta dissertação, assim como foi feito durante a etapa da pesquisa científica para elaboração da dissertação, inicialmente com simulações dos dispositivos relativamente simples, comparado aos demais analisados [4] e [5], para posteriormente implementar dispositivos mais complexos [3], [13], [27] e [28].

8.3 Publicações associadas ao trabalho

Dois artigos foram publicados em congresso de relevância da área de sistemas fotônicos e optoeletrônicos.

- O artigo “Análise da Tolerância de Erros de Fabricação de Portas Lógicas Ópticas em Cristais Fotônicos”, foi publicado em Salvador - BA, ENCOM 2018 [11].

Resumo: “*Rot this work we analyze in details the influence of the geometrical parameters of a universal all optical logical gate based on photonic crystals. We demonstrate a high tolerance against fabrication error on the order of 12 nm for the cylinder radius and more than 30nm on the lattice constant.*”

Autores: Pedro P. Matos Barreto, Vitaly F. Rodriguez Esquerre e Rafael A. Vieira.

- O artigo “*Fabrication Error Analysis of Photonic Crystals Optical Logic Gates*”,

foi publicado em Lima, no Peru, LAOP 2018 [25].

Resumo: *“Rot this work we analyze in detail the influence of the parameters of a universal logic gate based on photonic crystals. We have verified a high tolerance against manufacturing and error of the order of 10% for the cylinder radius and lattice constant.”*

Autores: Pedro P. Matos Barreto e Vitaly F. Rodriguez Esquerre.

REFERÊNCIAS

- [1] W. Liu, D. Yang, G. Shen, H. Tian e Y. Ji, “Design of ultra compact all-optical XOR, XNOR, NAND and OR gates using photonic crystal multi-mode interference waveguides,” *Optics & Laser Technology*, vol 50, pp. 55–64, 2013.
- [2] M. Raghdha, F. Nihal e S. A. Areed, “Fully Integrated AND and OR Optical Logic Gates,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, N°19, pp. 1900-1903, 2014.
- [3] C. X. D. Tang, Y. Lin, H. Yin e B. W. 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*, vol 316, pp.49-55, 2014.
- [4] Y. P. Yang, L. Kuen-Cherng, I. C. Yang, K. Y. Lee a, L. Yen-Juei e L. Wei-Yu, Y. TsungTsai, “All-optical photonic crystal AND gate with multiple operating wavelengths,” *Optics Communication*, vol 297, pp. 165–168, 2013.
- [5] P. Rani; Y. Kalra e R. K. Sinha, “Realization of AND gate in Y shaped photonic Crystal waveguide. Realization of AND gate in Y shaped photonic crystal waveguide,” *Optics Communications*, vol 297, pp. 227-231, 2013.
- [6] R. P. Khare, *Optical Fiber Communications*, 3rd edn, McGraw-Hill, Singapore, 1993.
- [7] G.P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 3rd edn, John Wiley, New York 2002.
- [8] T. Uthyakumart , R. V. Raja e K. Porsezian, “Realization of all-optical logic gates through three core photonic crystal fiber,” *Optics Communications*, vol 296, pp.124-131, 2013.
- [9] P. Rani, Y. Kalra e R. K. Sinha, “Design of all optical logic gates in photonic crystal waveguides,” *Optik*, vol 126, pp. 950–955, 2015.
- [10] T. Uthyakumart , R. V. Raja e K. Porsezian, “Realization of all-optical logic gates through three core photonic crystal fiber,” *Optics Communications*, vol 296, pp.124-131, 2013.
- [11] P. P. .Barreto, V. F. R. Esquerre e R. A. Vieira. “Análise da Tolerância de Erros de Fabricação de Portas Lógicas Ópticas em Cristais Fotônicos,” Encontro Anual do IECOM em Comunicação, Redes e Criptografia (ENCOM), paper 94, 2018.
- [12] Achary SN, Faculty of Physics Ganjam College, Ganjam, India “Novel All Optic Logic Gates using 2D Photonic Crystal Structure,” *Journal of Material Sciences & Engineering*, vol 4, pp. 174-178, 2015.
- [13] G. S. B. Filho, D. G. Correia, W. B. de Fraga e G. F. Guimarães, “Obtaining optical logic gates – OR, XOR, AND and logic functions using asymmetric Mach-Zehnder interferometer based on photonic crystal fiber,” *Optics and Laser Technology*, vol 97, pp. 370–378, 2017.
- [14] J. Townsend: *A Modern Approach to Quantum Mechanics*, 1st edition. (University Science Books: Claremont) 2000.
- [15] S. Aryan, M. Shahram e B. Ali, “Photonic crystal logic gates: an overview,” *Optical and Quantum Electronics*, vol 47, pp. 2249-2275, 2014.
- [16] W. P. Lin, Y. F. Hs e H. H. Lung. “Design of optical nor logic gates using two dimension photonic crystals,” *American Journal of Modern Physics*, vol 2, pp. 144-147, 2013.
- [17] M. Sahafi, A. Rostami e A. Sahafi. “All-optical high speed logic gates using SOA,” *Optics Communications*, vol 285, pp. 2289-2292, 2012.

- [18] H. T. Barnes, A. Jeffrey e G. H. Timothy, "Optical Logic Gates Using Grating Interferometers," *Optical Review*, vol. 1, pp. 170-173, 1994.
- [19] D. Franco Rêgo, "Dispositivos ópticos assimétricos baseados em cristais fotônicos lineares de silício," Universidade Federal da Bahia (UFBA). Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, 2014.
- [20] <https://www.intechopen.com/books/advances-in-photonic-crystals/photonic-crystal-ring-resonator-based-optical-filters>. Acessado em 7 de Janeiro de 2020. P. K. Choudhury, "Introductory Chapter: Photonic Crystals–Revisited," *Intechopen*, 85246, 2019, pp. 1-9. Available em: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.85246> Acessado em 7 de Janeiro de 2020.
- [21] J. M. Rico-Garcia, J. M. Lopez-Alonso e J. Alda, "Multivariate analysis of photonic crystal microcavities with fabrication defects," *The International Society for Optical Engineering Silicon Photonics (SPIE)*, vol. 5840, pp. 561-571, 2005.
- [22] F. A. Quiñonez, "Cristais fotônicos 2 D: projeto e fabricação," Universidade Estadual de Campinas, (UNICAMP). Instituto de Física Gleb Wataghin," Campinas, SP, 2006.
- [23] Y. Fu, X. Hu, C. Lu, S. Yue, H. Yang e Q. Gong. "All-Optical Logic Gates Based on Nanoscale Plasmonic Slot Waveguides," *Nano Lett*, vol 12, pp. 5784–5790, 2012.
- [24] Sonali Prava Dash e Sukanta Kumar Tripathy. "Y-shaped design in two dimensional photonic crystal structure for applications in integrated photonic circuits," *Optik Optics*, vol 124, pp. 3649-3650, 2013.
- [25] P. P. Barreto e V. F. R. Esquerre, "Fabrication Error Analysis of Photonic Crystals Optical Logic Gates," *Latin America Optics and Photonics Conference, OSA Technical Digest (Optical Society of America)*, paper Th3A.2, 2018.
- [26] F. G. Capuano. *Sistemas digitais: circuitos combinacionais e sequenciais*. São Paulo: Érica, 2014.
- [27] M. Dehdast e A. Bahrami, "Design of all-optical simultaneous AND, NAND, OR, and NOR logic gates using phase-based control of three coupled waveguides," *Photonic Network Communications*, vol 33, pp.136-142, 2017.
- [28] N. Nozhat, H. Alikomak e M. Khodadadi. "All-optical XOR and NAND logic gates based on plasmonic nanoparticles," *Optics Communications*, vol 392, 208–213, 2017.
- [29] H. Hu, X. Zhang e S. Zhao. "High-speed all-optical logic gate using QD-SOA and its application," *Journal Cogent Physics*, vol 4, pp. 1-21, 2017.
- [30] P. Singh, K. T. Devendra, S. Jaiswal e H. K. Dixit. "All-Optical Logic Gates: Designs, Classification, and Comparison," *Advances in Optical Technologies*, vol 2014, pp. 1-14, 2014.
- [31] G. O. Young, *Synthetic structure of industrial plastics*, 2nd edn, vol. 3, J. Peters, Ed. New York: McGraw-Hill, 1964, pp. 15–64.
- [32] H. B. Thomas, J. A. Davis e G. H. Timothy. "Optical Logic Gates Using Grating Interferometers," *Journal Article*, vol 1, n° 2, pp.170-173, 1994.
- [33] P. Rani, S. Fatima, Y. Kalra e R.K. Sinha, "Realization of all optical logic gates using universal NAND gates on photonic crystal platform," *Superlattices and Microstructures*, vol 109, pp. 619-625, 2017.
- [34] D. Williams, X. Bao e L. Chen. "All-optical NAND/NOT/AND/OR logic gates based on combined Brillouin gain and loss in an optical fiber," *Latin America Optics and Photonics Conference, OSA Technical Digest (Optical Society of America)*, vol 52, pp. 3404-3411, 2013.

- [35] R. B. Li, L. Deng e E. W. Hagley, “Fast, all-optical logic gates and transistor functionalities using a room-temperature atomic controlled Kerr gate,” *Physical Review A*, vol 90, pp. 1-4, 2014.
- [36] Y. A. Zaghloul e A. R. M. Zaghloul, “Complete all-optical processing polarization based binary logic gates and optical processors,” *Optics Express*, Vol 14, pp. 9879-9895.
- [37] R. B. Li, L. Deng e E. W. Hagley, “Fast, all-optical logic gates and transistor functionalities using a room-temperature atomic controlled Kerr gate,” *JournalPhysical Review*, vol 90, pp. 1-4, 2014.
- [38] E. N. Evgenii, “Photonic Hypercrystals,” *Physical Review A*, vol 4, pp. 1-13, 2014.
- [39] J. H. Kim, Y. I. Kim, Y. T. Byun, Y. M. Jhon, S. Lee, S. H. Kim e D. H. Woo. “All-Optical Logic Gates Using Semiconductor Optical-Amplifier-Based Devices and Their Applications,” *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 45, No. 5, pp. 1158-1161, 2004.
- [40] J. H. Kim, Y. I. Kim, Y. T. Byun, Y. M. Jhon, S. Lee, S. H. Kim e D. H. Woo. “All-Optical Logic Gates Using Semiconductor Optical-Amplifier-Based Devices and Their Applications,” *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 45, No. 5, pp. 1158-1161, 2004.
- [41] F. Davoodi e N. Granpayeh. “All Optical Logic Gates: A Tutorial,” *International Journal of Information & Communication Technology Reserarch*, vol 4, pp. 65-98. 2012.
- [42] X. Zhang, J. Xu, J. Dong e D. H. Wuhan. “All-Optical Logic Gates Based on Semiconductor Optical Amplifiers and Tunable Filters,” *Optical Super Computing*, vol 5882 pp. 19-29, 2009.
- [43] V. F. Rodriguez Esquerre, “Modelagem de estruturas fotônicas por elementos finitos 2D no domínio do tempo,” Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia e de Computação, 2003.
- [44] T. Tang, “Photonic band gap in a one-dimensional periodic structure with semiconductor metamaterial in the near-infrared,” *Optik*, vol 124, 6657-6660, 2013.
- [45] H. A Arafa e S. Walied “Superconductor-Semiconductor Metamaterial Photonic,” *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol 29, pp.4-6, 2016.
- [46] T. Uthayakumar e R.Vasanth, J. Raja e K. Porsezian. “Realization of all-optical logic gates through three core photonic crystal fiber,” *Optics Communications*, vol 296, pp. 124–131, 2013.
- [47] S. P. Dash, S. K. Tripathy e “Y-shaped design in two dimensional photonic crystal structure for applications in integrated photonic circuits,” *Optik*, vol 124, pp. 3649-3650, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2012.11.056>.
- [48] K. Arunachalam e S. Christina Xavier (2012), “Optical Logic Devices Based on Photonic Crystal, Photonic Crystals - Introduction, Applications and Theory,” *InTech*, ISBN: vol 51, pp. 978-953, Available: <http://www.intechopen.com/books/photonic-crystals-introduction-applicationsand-theory/optical-logic-devices-based-on-photonic-crystal>.
- [49] J. Gao, *Optoelectronic Integrated Circuit Design and Modeling*, 3rd edn. (Wiley. China, 2013).
- [50] M. Z. Ashkan e Alipour B. H. “All-optical AND/OR/NOT logic gates based on photonic crystal ring resonators,” *Optoelectron*, vol 9, pp. 578–584, 2016.
- [51] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade e J. N. Winn, *Photonic Crystals – Molding the Flow of Light*, Princeton University Press, New Jersey, 1995.
- [52] E. Hecht e A. Zajac, *Optics*, 3rd Edition, Hardcover, 1996.

- [53] G. R. Fowles, *Introduction to Modern Optics*, Dover Publications, New York, 1989.
- [54] P. Yeh, *Optical Waves in Layered Media*, John Wiley & Sons, New York, 1988.
- [55] E. Yablonovitch, "Photonic Crystals: Semiconductors of Light," *Scientific American*, vol 285, pp. 34-41, 2001.
- [56] E. Yablonovitch, "Photonic Crystals," *Journal of Modern Optics*, vol 41, pp.173-194, 1994.
- [57] Z. Y. Li, C. Wang e L. Gan. "Silicon Photonic Crystals Towards Optical Integration," *INTECH Open Science*, 2013, Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5772/55041>, Acesso em 18 de Outubro de 2018.
- [58] C. W. Yu, C. W. Chen, H. C. Jau, C. C. Li, C. Yu, C.T. Wang, S. E. Leng e I. C. K. T. Lin. "All-optical transistor and diodeaction and logic gates based on anisotropic nonlinear responsive liquid crystal," *Scientific Reports*, vol 6, n° 30873, 2016.
- [59] D. Segura, D. Vega, D. Cardador e A. Rodriguez, "Effect of fabrication tolerances in macroporous silicon photonic crystals," *Sensors and Actuators A*, vol 264, pp. 172–179, 2017.
- [60] W. Fan, Z. Hao, Z. Li, Y. Zhao e Y. Luo, "Influence of Fabrication Error on the Characteristics of a 2-D Photonic-Crystal Cavity", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, pp. 1455-1458, 2010.
- [61] C. Vázquez, A. Tapetado, J. Orcutt, H. C. Meng e R. Ram, "Tolerance analysis for efficient MMI devices in silicon photonics," *The International Society for Optical Engineering Silicon Photonics (SPIE)*, vol. 5840, pp. 89900A-89900A-7, 2014.
- [62] P. E. Morrissey, H. Yang, R. N. Sheehan, B. Corbett e F.H. Peters, "Design and fabrication tolerance analysis of multimode interference couplers," *Optics Communications*, vol 340, pp. 26–32, 2015.
- [63] R. Halir, A. Ortega-Moñux, J. G. W. Pérez e I. M. Fernández, "Fabrication Tolerance Analysis of Bent Single-Mode Rib Waveguides on SOI," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 38, pp. 921–932, 2007.
- [64] J. Wang, F. Zhang, Q. Song, A. Zeng, J. Zhu e H. Huang, "Fabrication error analysis for diffractive optical elements used in a lithography illumination system," *Optical Engineering*, vol 54, pp. 1-8, 2015.
- [65] T. T. Le, "Analysis of Fabrication Tolerances of Couplers based on Slot Multimode Interference Structures with Arbitrary Power Splitting Ratios," *International Journal of Electronics and Communication Engineering*, vol 5, pp. 65-75, 2012.
- [66] G. P. Agrawal. *Fiber-Optic Communications Systems*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, San Diego, 2002.
- [67] C. E. R. Mercedes e H. E. H. Figueroa, "Padé boundary conditions for the finite-element solution of arbitrary planar junctions," *Journal of Lightwave Technology*, vol 22, pp. 669-676, 2004.
- [68] X. Yang, X. Hu, H. Yang e Q. Gong, "Ultracompact all-optical logic gates based on nonlinear plasmonic nanocavities," *Nanophotonics*, vol 6, pp. 365–376, 2017.
- [69] Y. Fu, X. Hu e Q. Gong, "Silicon photonic crystal all-optical logic gates," *Physics Letters*, vol 377, pp. 329-333, 2013.
- [70] K. Goudarzi, M. Ali, I. Chaharmahali e D. Goudarzi. "All-optical XOR and OR logic gates based online and point defects in 2-D photonic crystal," *Optics & Laser Technology*, vol 78, pp. 139–142, 2016.
- [71] A. M. Fontana e A. C. Sodr , "Metamateriais e Aplica  es em Telecomunica  es," V SRST Seminário de Redes e Sistemas de Telecomunica  es, Instituto Nacional de Telecomunica  es (INATEL), Issn 2358-1913, 2016