



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CAMPUS DE SOBRAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E  
COMPUTAÇÃO – PPGEEC**

**FRANCISCO LEONARDO BEZERRA MARTINS**

**PORTAS LÓGICAS DE DUAS E TRÊS ENTRADAS NUMA FIBRA DE CRISTAL  
FOTÔNICO DE TRÊS NÚCLEOS**

**SOBRAL – CE**

**2018**

FRANCISCO LEONARDO BEZERRA MARTINS

PORTAS LÓGICAS DE DUAS E TRÊS ENTRADAS NUMA FIBRA DE CRISTAL  
FOTÔNICO DE TRÊS NÚCLEOS

Dissertação apresentada à coordenação do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Computação na UFC, Campus de Sobral, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e Computação.

Orientador: Prof. Dr. José Cláudio do Nascimento.

SOBRAL – CE

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M343p Martins, Francisco Leonardo Bezerra Martins.

Portas lógicas de duas e três entradas numa fibra de cristal fotônico de três núcleos / Francisco Leonardo Bezerra Martins Martins. – 2018.  
44 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Sobral, 2018.

Orientação: Prof. Dr. José Cláudio do Nascimento.

1. Porta Lógica Totalmente Óptica. 2. Acoplador Direcional Não Linear (NLDC). 3. Fibra de Cristal Fotônico (PCF). 4. Modulação por Amplitude de Pulso (PAM). I. Título.

CDD 621.3

---

FRANCISCO LEONARDO BEZERRA MARTINS

PORTAS LÓGICAS DE DUAS E TRÊS ENTRADAS NUMA FIBRA DE CRISTAL  
FOTÔNICO DE TRÊS NÚCLEOS

Dissertação apresentada à coordenação do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Computação na UFC, Campus de Sobral, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e Computação.

Orientador: Prof. Dr. José Cláudio do Nascimento.

Aprovada em 04 de outubro de 2018, pela banca examinadora constituída por:

---

Prof. Dr. José Cláudio do Nascimento (Orientador)  
(PPGEEC – Universidade Federal do Ceará – Campus de Sobral)

---

Prof. Dr. Wilton Bezerra de Fraga (Examinador Interno)  
(PPGEEC– Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Sobral)

---

Prof. Dr. Paulo Regis Menezes Sousa (Examinador Externo)  
(UVA – Universidade Estadual Vale do Acaraú)

À Deus, à minha família, ao meu professor orientador e aos meus amigos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família, meus pais, Luiz Rocha Martins e Lúcia Maria Bezerra Martins, e meus irmãos, Adriano Bezerra Martins e Letícia Bezerra Martins, por cada pequena ajuda, pelo apoio e incentivo que me deram ao longo do curso e de toda minha vida até agora.

Aos meus amigos dos cursos de graduação em Engenharia Elétrica, Engenharia da Computação e do mestrado em Engenharia Elétrica e Computação pelo PPGEEC, por sua valiosa amizade e por todo o apoio que me deram ao longo do curso.

Aos professores dos cursos de Engenharia Elétrica e Computação, em especial ao meu orientador e amigo, professor José Cláudio do Nascimento, por todo o seu apoio, confiança e paciência ao longo de minha trajetória no curso.

À Universidade Federal do Ceará, pela oportunidade de cursar Engenharia Elétrica e agora este mestrado através do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Computação, e pela bolsa de auxílio (FUNCAP) sem a qual eu não poderia ter feito o curso.

À Deus, pelo dom da vida, pela inteligência, pela saúde e pela força que me deu para enfrentar cada um dos problemas pessoais e acadêmicos ao longo de todo o curso.

## RESUMO

A propagação de pulsos solitônicos de 100 fs numa fibra de cristal fotônico (PCF) pode ser simulada através da resolução de equações não lineares de modos acoplados usando o método Runge-Kutta de 4ª ordem. Neste trabalho objetivamos obter um dispositivo capaz de realizar as operações lógicas OR e AND pra três sinais de entrada. O dispositivo deve ser de pequeno comprimento e funcionar com pulsos de baixa intensidade modulados em PAM-ASK. Para isso utilizamos uma nova metodologia na qual damos foco especial ao dimensionamento do comprimento de acopladores (buscando portas lógicas em acopladores cujos comprimentos são menores que o comprimento de acoplamento) e no aproveitamento dos núcleos (aproveitando todos os núcleos do acoplador como guias de sinais a serem processados). Deste modo, demonstramos numericamente a aquisição de dois dispositivos totalmente ópticos que realizam as operações lógicas OR e AND numa PCF de três núcleos sólidos em arranjo planar simétrico. Para o primeiro dispositivo, obtivemos as portas lógicas triplas passivas OR e AND, ambas operando com taxas de contraste superiores à 0,3 dB (alto desempenho), podendo, portanto, serem usadas para substituir circuitos ópticos mais complexos (onde a ocorrência de expressões booleanas como as portas OR e AND triplas são muito comuns). Esse resultado descarta a necessidade de concatenação de portas elementares, economizando espaço e eliminando os problemas relacionados ao cascadeamento de portas. Para o segundo dispositivo, obtivemos as portas lógicas ativas OR e AND, ambas operando com taxas de contraste excepcionalmente altas e, portanto, podendo ser usadas no processamento de sinais ópticos.

**Palavras-chave:** Porta Lógica Totalmente Óptica; Acoplador Direcional Não Linear (NLDC); Fibra de Cristal Fotônico (PCF); Modulação por Amplitude de Pulso (PAM).

## **ABSTRACT**

*The propagation of 100 femto-second (fs) solitonic pulses in a photonic crystal fiber (PCF) can be simulated by solving the coupled mode non-linear equations with the 4th order Runge-Kutta method. In this work we aim to obtain a device capable of performing the three-input OR and AND logic operations. The device must be of small length and operate with low-intensity pulses modulated in PAM-ASK. For this we use a new methodology in which we give special focus to the dimensioning of the couplers' length (by searching for logic gates in couplers whose lengths are smaller than the coupling length) and in the utilization of cores (using of all cores as guides in which signals can be processed). Like this, we numerically demonstrate the acquisition of two all-optical devices that perform the OR and AND logic operations on a solid core PCF with three symmetrical cores in planar array. For the first device, we obtained the passive three-input OR and AND all-optical logic gates, which operated with contrast ratios higher than 0,3 dB (high performance), so they could be used to replace more complex optical circuits (in which the occurrence of Boolean expressions like the three-input OR and three-input AND are very common). This result eliminates the need for the concatenation of elementary logic gates, therefore saving space and eliminating problems regarding the cascading of logic gates. For the second device, we obtained the active two-input OR and AND all-optical logic gates, which operated with exceptionally high contrast ratios and could therefore be used in optical signals processing.*

**Keywords** — *All-Optical Logic Gate; Nonlinear Directional Coupler (NLDC); Photonic Crystal Fiber (PCF); Pulse Amplitude Modulation (PAM).*

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Esquemático da secção transversal de uma PCF de núcleo sólido. **(a)** Ênfase na matriz esburacada e seus principais parâmetros físicos ( $d$  e  $\Lambda$ ). **(b)** Ênfase nas variações nos índices de refração do núcleo, casca (matriz de buracos) e revestimento externo.
- Figura 2** – **(a)** Vista microscópica da secção transversal de uma PCF de núcleo sólido. **(b)** Vista microscópica da secção transversal de uma PCF de núcleo oco.
- Figura 3** – Esquemático de um acoplador duplo simétrico. **(a)** Esquema de um acoplador de fibra de 2 núcleos. **(b)** Secção transversal de um acoplador de PCF de dois núcleos.
- Figura 4** – Modelo esquemático de um acoplador triplo. O acoplador tem 3 portas de entrada ( $S_1, S_2$  e  $S_3$ ) e 3 portas de saída ( $S_4, S_5$  e  $S_6$ ). O comprimento de acoplamento é dado por  $L_C$ .
- Figura 5** – Modelos de acoplador triplo de PCF mais comuns. **(a)** Acoplador triplo planar. **(b)** Acoplador triplo triangular.
- Figura 6** – Esquemático da seção transversal da PCF empregada. Aqui,  $C$  é a distância entre dois núcleos adjacentes,  $d$  é o diâmetro de buraco e  $\Lambda$  é a distância entre buracos. Os núcleos são enumerados como 1, 2 e 3 e são organizados como mostrado.
- Figura 7** – Esquemático do acoplador estudado. Os blocos  $\varepsilon$  são os moduladores de amplitude,  $\Delta\phi$  são os controladores de fase e  $L_C$  é o comprimento de acoplamento. Presume-se que o controlador de fase seja composto por uma linha de atraso totalmente óptica.
- Figura 8** – Pulsos de saída para a porta lógica passiva de três entradas AND(A, B, C) obtida no dispositivo de  $L = 1,08$  cm.
- Figura 9** – Pulsos de saída para a porta lógica passiva de três entradas OR(A, B, C) obtida no dispositivo de  $L = 1,08$  cm.
- Figura 10** – Pulsos de saída para a porta lógica ativa de duas entradas AND(A, B) obtida no dispositivo de  $L = 1,2$  cm.
- Figura 11** – Pulsos de saída para a porta lógica ativa de duas entradas OR(A, B) obtida no dispositivo de  $L = 1,2$  cm.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>2C-NLDC</b>	Do inglês ( <i>Two-Core Nonlinear Diretional Coupler</i> ), Acoplador Direcional Não Linear de Dois Núcleos.
<b>3C-NLDC</b>	Do inglês ( <i>Three-Core Nonlinear Diretional Coupler</i> ), Acoplador Direcional Não Linear de Três Núcleos.
<b>ASK</b>	Do inglês ( <i>Amplitude Shift Keying</i> ), Chaveamento por Amplitude de Pulso.
<b>CR</b>	Do inglês ( <i>Contrast Ratio</i> ), Taxa de Contraste.
<b>FWM</b>	Do inglês ( <i>Four-Wave Mixing</i> ), Mistura de quatro ondas.
<b>GVD</b>	Do inglês ( <i>Group Velocity Dispersion</i> ), Dispersão de Velocidade de Grupo.
<b>NLDC</b>	Do inglês ( <i>Nonlinear Diretional Coupler</i> ), Acoplador Direcional Não Linear.
<b>PAM</b>	Do inglês ( <i>Pulse Amplitude Modulation</i> ), Modulação por Amplitude de Pulso.
<b>PCF</b>	Do inglês ( <i>Photonic Crystal Fiber</i> ), Fibra de Cristal Fotônico.
<b>SPM</b>	Do inglês ( <i>Self Phase Modulation</i> ), Automodulação de Fase.
<b>TFWHM</b>	Do inglês ( <i>Temporal Full-Width at Half Maximum</i> ), Largura Temporal à Meia Altura.
<b>TOD</b>	Do inglês ( <i>Third Order Dispersion</i> ), Dispersão de Terceira Ordem.
<b>XPM</b>	Do inglês ( <i>Cross-Phase Modulation</i> ), Modulação de Fase Cruzada.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{OUT}$	Amplitude de saída.
$A_{REF}$	Amplitude de referência.
$A_{eff}$	Área de modo efetiva.
$D_g$	Dispersão geométrica.
$D_m$	Dispersão material.
$L_C$	Comprimento de acoplamento.
$P_C$	Potência crítica.
$P_{REF}$	Potência de pico de referência.
$S_i$	Porta de entrada/saída $i$ .
$T_R$	Coefficiente de espalhamento Raman.
$T_i$	Transmissão de energia da guia (ou núcleo) $i$ .
$a_i$	Amplitude do envoltório de variação lenta do pulso inserido na guia (ou núcleo) $i$ .
$k_0$	Número de onda do espaço livre.
$n_{NL}$	Comprimento de onda não linear.
$n_{eff}$	Índice de refração efetivo do modo.
$n_m$	Dispersão cromática do material.
$n_2$	Índice não linear do material.
$v_g$	Velocidade de grupo.
$\beta_0$	Defasagem entre os pulsos.
$\beta_2$	Dispersão de velocidade de grupo.
$\beta_3$	Dispersão de terceira ordem.
$\kappa_{ij}$	Constante de acoplamento da fibra $i$ em relação à fibra $j$ .
$C$	Distância entre dois núcleos adjacentes.
$D$	Dispersão total.
$E$	Campo elétrico transversal
$L$	Comprimento da fibra.
$P$	Potência de pico do pulso propagado.
$d$	Diâmetro de buraco.
$t$	Tempo de trânsito de pulso.

$\Lambda$	Espaçamento buraco-a-buraco.
$\beta$	Constante de propagação.
$\gamma$	Não linearidade efetiva.
$\eta$	Pequena taxa que relaciona a influência de XPM em SPM.
$\lambda$	Comprimento de onda da luz.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Fibra de Cristal Fotônico (PCF) .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2</b>	<b>Tipos de PCF, Vantagens e Aplicações .....</b>	<b>4</b>
<b>2.3</b>	<b>Não Linearidade .....</b>	<b>5</b>
<b>2.4</b>	<b>Dispersão .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>ACOPLADORES ÓPTICOS .....</b>	<b>7</b>
<b>3.1</b>	<b>Acoplador Duplo Simétrico .....</b>	<b>7</b>
<b>3.1.1</b>	<i>Transmissão de potência e comprimento de acoplamento .....</i>	<b>8</b>
<b>3.2</b>	<b>Acoplador Triplo Simétrico .....</b>	<b>9</b>
<b>3.3</b>	<b>Acoplador Triplo Simétrico Planar .....</b>	<b>11</b>
<b>3.3.1</b>	<i>Equações de modos acoplados .....</i>	<b>11</b>
<b>3.3.2</b>	<i>Transmissão e comprimento de acoplamento .....</i>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>14</b>
<b>4.1</b>	<b>Fibra de Cristal Fotônico.....</b>	<b>14</b>
<b>4.2</b>	<b>Modelo de Acoplador .....</b>	<b>14</b>
<b>4.3</b>	<b>Modulação PAM-ASK .....</b>	<b>15</b>
<b>4.4</b>	<b>Método Numérico .....</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>5.1</b>	<b>Primeiro Dispositivo .....</b>	<b>18</b>
<b>5.2</b>	<b>Segundo Dispositivo .....</b>	<b>21</b>
<b>5.3</b>	<b>Comparação com outros trabalhos .....</b>	<b>23</b>

<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>26</b>
<b>7</b>	<b>PUBLICAÇÕES RELACIONADAS .....</b>	<b>27</b>
<b>8</b>	<b>PERSPECTIVAS FUTURAS .....</b>	<b>28</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>29</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Desde os sinais de fumaça à invenção do telégrafo, do telefone, das micro-ondas e mais recentemente da comunicação por fibras ópticas o ser humano tem procurado por maneiras cada vez mais rápidas, seguras e confiáveis de transmitir dados à longas distâncias, sendo esta necessidade cada vez mais acentuada conforme evoluem outras tecnologias.

Atualmente, com o advento da internet, das mídias em alta definição e da globalização, a necessidade por taxas de transmissão e processamento de dados cada vez mais altas tem mostrado que o atual sistema (o sistema eletrônico de representação, transmissão e processamento de dados) está atingindo seu limite, sendo a causa disto as próprias limitações da eletrônica. Uma possível solução a esse problema é a implementação de sistemas de processamento totalmente ópticos (ou fotônicos). Nestes sistemas, pulsos luminosos tomariam o lugar de pulsos elétricos, circuitos lógicos ópticos substituiriam circuitos eletrônicos e toda informação digital seria transmitida e processada de forma mais segura e numa velocidade varias ordens de magnitude maior do que as obtidas nos sistemas eletrônicos atuais.

O objetivo central por trás da pesquisa e obtenção de portas lógicas totalmente ópticas é a criação de circuitos lógicos complexos e eventual obtenção de processadores completamente fotônicos. Desta forma, o primeiro passo em direção à um eventual sistema de processamento fotônico é obtenção de portas (ou expressões) lógicas totalmente ópticas de alta performance. Neste sentido, vale a pena observar que embora as portas OR, AND e NOT sejam suficientes para a criação de qualquer circuito lógico, a obtenção de algumas das expressões lógicas mais usadas, como as portas NAND, NOR, XOR, XNOR, além das portas AND e OR de três entradas, também são de grande interesse uma vez que podemos economizar em recursos, espaço, perdas de energia e tempo de processamento quando usando expressões prontas ao invés de um conjunto de outras portas lógicas concatenadas. Dentre essas as portas AND e OR de três entradas são as únicas que (até o presente momento) não foram demonstradas.

Neste trabalho, demonstramos numericamente a aquisição de portas lógicas totalmente ópticas através de um acoplador de fibra de cristal fotônico (PCF) de três núcleos operando com pulsos solitônicos de  $100\text{ fs}$  modulados em PAM-ASK. Demonstramos aqui dois dispositivos de comprimentos  $L = 1,08\text{ cm}$  e  $L = 1,2\text{ cm}$ , ambos menores do que o menor comprimento de acoplamento deste tipo de acoplador (e cerca de duas vezes menores do que os comprimentos de acoplamento mais utilizados para este acoplador na literatura [1,

2, 3, 4, 5, 6 e 7]). No primeiro dispositivo,  $L = 1,08 \text{ cm}$ , encontramos duas das expressões Booleanas mais comuns em circuitos lógicos: as portas triplas (de três entradas) passivas AND e OR. No segundo dispositivo,  $L = 1,2 \text{ cm}$ , encontramos as portas lógicas duplas (de duas entradas) ativas AND e OR. Todas as portas lógicas demonstradas mostraram possuir taxas de contraste acima de  $0,3 \text{ dB}$  no pior caso, sendo, portanto, de alto desempenho.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: na seção 2, apresentamos algumas das características, tipos, propriedades e aplicações das PCFs utilizadas como base dos dispositivos demonstrados neste trabalho; Na seção 3, apresentamos e discutimos os modelos teóricos dos acopladores ópticos de PCF, com foco em especial no acoplador triplo simétrico de arranjo planar, o qual estudamos as características de transmissão e chaveamento de potência óptica a partir de suas equações de modos acoplados; Na seção 4, discutimos sobre as características e propriedades dos materiais e dispositivos a serem utilizados, além da metodologia e parâmetros adotados nas análises e simulações numéricas empregadas na obtenção do dispositivo final; Na seção 5, apresentamos uma análise dos resultados obtidos; Finalmente, na seção 6 apresentamos a conclusão deste trabalho.

## 2 FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO

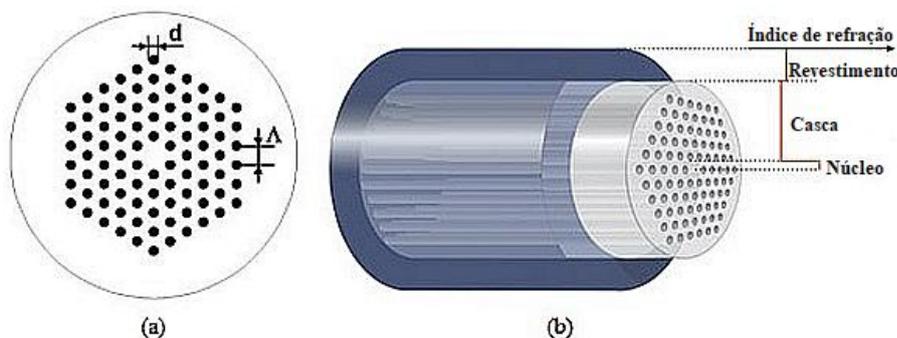
Nesta seção discutimos as características físicas, não linearidade, propriedades de dispersão, tipos e vantagens das fibras de cristal fotônico em comparação às fibras convencionais.

### 2.1 Fibra de Cristal Fotônico (PCF)

A fibra de cristal fotônico (PCF, do inglês *photonic crystal fiber*), também conhecida como fibra micro estruturada (ou fibra esburacada), é uma fibra óptica feita de sílica não dopada e é, externamente, muito semelhante à fibra óptica convencional. Sua principal diferença estrutural consiste em um arranjo ordenado de buracos de ar microscópicos que se estendem ao longo do seu comprimento, formando uma matriz (veja a figura 1(a)). Diferente das fibras convencionais, cujas propriedades de guiamento dependem da diferença entre os índices de refração do vidro óptico utilizado nas regiões de núcleo e casca, as propriedades de guiamento na PCF são determinadas pelo tamanho e padrão dos buracos de ar nas regiões de sílica sólida [8, 9, 10].

A matriz esburacada (veja a figura 1) tem como principais parâmetros físicos o diâmetro dos buracos (geralmente preenchidos de ar),  $d$ , e o espaçamento entre os buracos,  $\Lambda$ . A razão  $d/\Lambda$  é de grande importância na determinação de diversas características da PCF. Se mantidas as proporções entre o comprimento de onda ( $\lambda$ ) e as características geométricas da PCF ( $d$  e  $\Lambda$ ), torna-se possível o estudo de dispositivos baseados em PCF independente do comprimento de onda do mesmo.

**Figura 7.** Esquemático da seção transversal de uma PCF de núcleo sólido. (a) Ênfase na matriz esburacada e seus principais parâmetros físicos ( $d$  e  $\Lambda$ ). (b) Ênfase nas variações nos índices de refração do núcleo, casca (matriz de buracos) e revestimento externo.

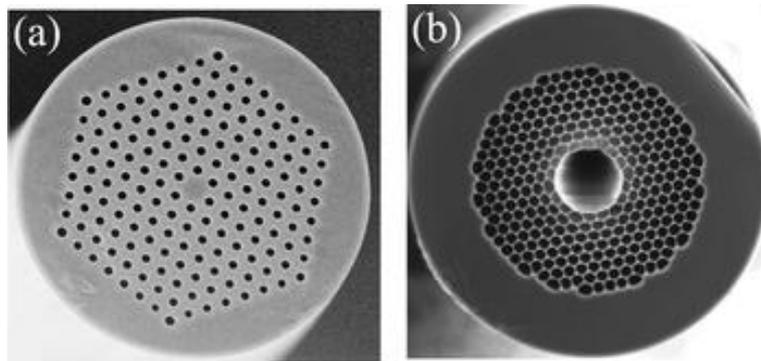


Fonte: [5].

## 2.2 Tipos de PCF, Vantagens e Aplicações

As PCFs são geralmente categorizadas em dois tipos: PCF de núcleo sólido e PCF de núcleo oco (veja a figura 2), cada uma fornecendo propriedades únicas. PCFs de núcleos sólidos guiam a luz através de uma forma modificada de reflexão interna total, enquanto que PCFs de núcleos ocos exploram o efeito '*band gap*' fotônico para guiar a luz [11, 12, 13].

**Figura 2.** (a) Vista microscópica da seção transversal de uma PCF de núcleo sólido. (b) Vista microscópica da seção transversal de uma PCF de núcleo oco.



**Fonte:** [14].

A resposta não linear melhorada observada na PCF surge como uma combinação do seu forte confinamento de modo e propriedades de dispersão alteradas. A dispersão nestas fibras pode ser adaptada (personalizada) alterando seus parâmetros geométricos: comprimento da fibra, diâmetro do buraco de ar, distância entre buracos, padrão de perfuração, quantidade de núcleos, disposição dos núcleos (planar, triangular, etc.), distância entre núcleos, etc. [9, 15, 16]. Um forte campo de confinamento de luz pode ser obtido com um alto contraste entre os índices de refração do núcleo e da casca esburacada [17], o que permite melhores interações ópticas não-lineares a energias mais baixas se comparadas às fibras convencionais. Isso possibilita a criação de compactos e custo-efetivos dispositivos de telecomunicações com fibras curtas e fontes luminosas de relativamente baixo custo.

As PCFs têm sido projetadas para satisfazer diversas aplicações específicas, das quais podemos citar: atendimento à exigências específicas de dispersão [16]; aumento ou diminuição de não linearidade [8, 17]; operação monomodo numa faixa extremamente ampla de comprimentos de onda [11]; suporte de maiores ou menores diâmetros de modo de campo [18, 19]; e apresentação de comportamento altamente birrefringente, resultando em melhor controle de polarização [20, 21].

### 2.3 Não Linearidade

Para as aplicações de características não lineares típicas em comunicações ópticas, PCFs de pequenos núcleos sólidos são preferidas uma vez que permitem um confinamento de modo muito mais forte, e, portanto, não linearidades muito mais elevadas [17]. A não-linearidade efetiva  $\gamma$  de uma fibra é dada por:

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \quad (2.1)$$

onde  $A_{eff}$  é a área efetiva,  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $n_2$  é o coeficiente de índice não linear [10]. Assim, uma maneira de aumentar a não-linearidade é reduzir a área efetiva [17]. Este procedimento é ineficaz em fibras convencionais uma vez que uma redução da área efetiva da fibra dificultaria o confinamento de modo, diminuindo o valor de  $\gamma$  [10]. Por outro lado, utilizando PCFs, a área efetiva pode ser reduzida pela escolha apropriada do tamanho e do padrão dos buracos de ar na matriz esburacada, aumentando assim a variação de fase não-linear durante a propagação do pulso na fibra. A área de modo não linear efetiva de uma PCF é dada por:

$$A_{eff} = \frac{n_2 [\int \int E(x, y) \cdot E^*(x, y) dx dy]^2}{\int \int \bar{n}_2(x, y) [E(x, y) \cdot E^*(x, y)]^2 dx dy} \quad (2.2)$$

onde  $E(x, y)$  é o campo elétrico transversal e  $\bar{n}_2(x, y)$  é o índice não linear do material na posição  $(x, y)$  [17].

### 2.4 Dispersão

Em PCFs, a dispersão de velocidade de grupo (GVD) é determinada tanto pela dispersão da própria sílica quanto pelos parâmetros de diâmetro de buraco,  $d$ , distância entre buracos,  $\Lambda$ , e o padrão da matriz esburacada, o que permite maior flexibilidade no design de dispersão para se adequar à aplicação requerida. O coeficiente de dispersão de uma fibra é dado por:

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{eff}(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (2.3)$$

onde  $\beta_2$  é a dispersão de velocidade de grupo,  $n_{eff}$  é o índice de refração efetivo do modo, dado por  $n_{eff}(x, y) = \beta[\lambda, n_m(\lambda)]/k_0$ ,  $\beta$  é a constante de propagação,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  é o número de onda do espaço livre e  $n_m(\lambda)$  é a dispersão cromática do material [10].

Assim, a dispersão na fibra é determinada por dois tipos de dependência de  $\beta$  em relação a  $\lambda$ : A dispersão geométrica,  $D_g$ , dada por  $D_g = -\left(\frac{\lambda}{c}\right) d^2 n_g(\lambda)/d\lambda^2$ , que se origina da dependência explícita de  $\beta$  em relação à  $\lambda$ , e é produzida pela geometria de distribuição do índice de refração  $n_g(\lambda)$  na PCF; E a dispersão material,  $D_m$ , dada por  $D_m = -\left(\frac{\lambda}{c}\right) d^2 n_m(\lambda)/d\lambda^2$ , que se origina da dependência implícita de  $\beta$  em relação à  $\lambda$  através da dispersão cromática do material. A dispersão total  $D$  é então calculada como a soma da dispersão geométrica  $D_g$  e da dispersão material  $D_m$  na aproximação de primeira ordem [22]:

$$D \approx D_g + D_m \quad (2.4)$$

Assim, fica claro que o problema em projetar a dispersão numa PCF é projetar  $D_g$ . O índice de refração efetivo  $n_g(\lambda)$  depende dos parâmetros de revestimento ( $d$  e  $\Lambda$ ) e do comprimento de onda  $\lambda$ . Assim, a dispersão de velocidade de grupo (GVD) pode ser projetada a partir de (2.4). Esta propriedade foi extensivamente investigada numericamente [16, 22, 23, 24, 25].

### 3 ACOPLADORES ÓPTICOS

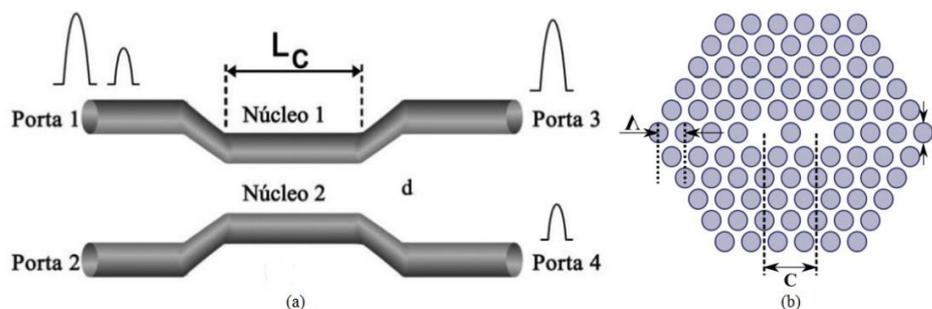
A constante necessidade em se aumentar a velocidade de transmissão de dados em sistemas de comunicação tem cada vez mais incentivado a criação de dispositivos capazes de um processamento totalmente óptico. Neste sentido, têm sido propostos e implementados diversos dispositivos ópticos passivos e ativos, sendo entre estes de especial importância os acopladores de fibra, que vêm despertando cada vez mais interesse devido à suas altas capacidades de comutação de energia em altíssimas velocidades.

O acoplador óptico é um dispositivo composto por duas ou mais guias de onda fisicamente separadas (no caso de fibras convencionais), ou uma única fibra com dois ou mais núcleos (no caso de PCFs). Devido à proximidade de seus núcleos, os modos fundamentais de propagação de cada núcleo se sobrepõe parcialmente na região da casca entre os dois (acoplamento evanescente), resultando numa transferência de potência óptica entre estes. Esta transferência de potência está relacionada com a potência crítica do acoplador. Para que ocorra a interação entre os campos nas guias, a relação  $d/\Lambda$  deve permanecer entre 2 e 4 [26], ou seja, o diâmetro dos buracos ‘ $d$ ’ deve ser pelo menos 2 vezes maior de que o espaçamento entre os núcleos destes ‘ $\Lambda$ ’, logo, o espaçamento entre um buraco e outro deve ser de pelo menos ‘ $d$ ’.

#### 3.1 Acoplador Duplo Simétrico

Acopladores duplos são dispositivos de 4 portas (duas de entrada e duas de saída, veja a figura 3) que dividem e direcionam um feixe de luz incidente em uma de suas entradas às suas portas de saída. Este chaveamento de energia é dependente da potência de pico do feixe de luz incidente.

**Figura 3.** Esquemático de um acoplador duplo simétrico. (a) Esquema de um acoplador de fibra de 2 núcleos. (b) Secção transversal de um acoplador de PCF de dois núcleos.



Fonte: [1].

No acoplador duplo, para potências ópticas menores do que um dado valor de potência, conhecido como potência crítica,  $P_C$ , um feixe óptico aplicado à porta de entrada 1 (primeira guia) é completamente comutado para a porta de saída 4 (segunda guia). Para potências ópticas maiores do que  $P_C$ , um feixe óptico aplicado à porta de entrada 1 (primeira guia) não é comutado e é simplesmente direcionado à porta de saída 3 (primeira guia). Para uma potência óptica igual a  $P_C$ , um feixe óptico aplicado à porta de entrada 1 (primeira guia) é dividido em dois (50% da energia para cada) e comutado para as portas de saída 3 e 4 (as duas guias). A potência crítica nesses acopladores é dada por:

$$P_C = \frac{\lambda A_{eff}}{n_{NL} L_C} \quad (3.1)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda guiado,  $n_{NL}$  é o comprimento de onda não linear,  $A_{eff}$  é a área de modo não linear efetiva e  $L_C$  é o comprimento de acoplamento.

### 3.1.1 Transmissão de potência e comprimento de acoplamento

Para um acoplador duplo em PCF as equações de modo acoplado, considerando os efeitos de variação de fase, deslocamento temporal, alargamento temporal (GVT), alargamento temporal assimétrico (TOD), constante de acoplamento, auto modulação de fase (SPM) e modulação de fase cruzada (XPM), são dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_1}{\partial z} + i\beta_{01}a_1 + \beta_{11} \frac{\partial a_1}{\partial t} + i \frac{\beta_{21}}{2} \frac{\partial^2 a_1}{\partial t^2} + \frac{\beta_{31}}{6} \frac{\partial^3 a_1}{\partial t^3} \\ = i\kappa_{12}a_2 + \gamma_1(|a_1|^2 + \eta_{12}|a_2|^2)a_1 \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_2}{\partial z} + i\beta_{02}a_2 + \beta_{12} \frac{\partial a_2}{\partial t} + i \frac{\beta_{22}}{2} \frac{\partial^2 a_2}{\partial t^2} + \frac{\beta_{32}}{6} \frac{\partial^3 a_2}{\partial t^3} \\ = i\kappa_{21}a_1 + \gamma_2(|a_2|^2 + \eta_{21}|a_1|^2)a_2 \end{aligned} \quad (3.3)$$

onde  $a_i$  é o envoltório de variação lenta se propagando na guia  $i$ ,  $\beta_0$  é a defasagem entre os pulsos,  $\beta_1$  é a constante de propagação,  $\beta_2$  é a de dispersão por velocidade de grupo,  $\beta_3$  é a dispersão de terceira ordem,  $\kappa_{ij}$  é a constante de acoplamento da fibra  $i$  em relação à fibra  $j$ ,  $\gamma$  é a não linearidade efetiva (relacionada à SPM) e  $\eta$  é uma pequena taxa que relaciona a influência de XPM em SPM.

Considerando um acoplador de pequeno comprimento (desprezando-se assim os efeitos não lineares de dispersão), simétrico ( $\beta_{i1} = \beta_{i2}$ ) e de núcleos idênticos, bombeado com pulsos de baixa potência e de mesma fase inicial ( $\beta_0 = 0$ ), temos a seguinte equação de modos acoplados [27]:

$$\frac{\partial a_1}{\partial z} = i\kappa a_2 \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial a_2}{\partial z} = i\kappa a_1 \quad (3.5)$$

Resolvendo analiticamente este sistema de equações diferenciais obtemos que, para um pulso na forma normalizada inserido apenas no núcleo 1, teremos [27]:

$$\begin{bmatrix} \cos(\kappa z) & i \sin(\kappa z) \\ i \sin(\kappa z) & \cos(\kappa z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\kappa z) \\ i \sin(\kappa z) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

onde a transmissão no núcleo 1 será dada por  $T_1^2 = (\cos(\kappa z))^2$ . Assim, o comprimento de acoplamento necessário para uma transmissão  $T_1^2 = 0$  (ou seja, para um chaveamento completo do pulso do núcleo 1 para o núcleo 2) é:

$$L_C = \frac{\pi}{2\kappa} + \frac{n\pi}{\kappa}, \text{ com } n = 0, 1, 2, \dots \quad (3.7)$$

Como o acoplador é simétrico e com núcleos idênticos, a transmissão em 2 é a mesma de 1. Assim, o acoplador duplo simétrico é capaz de transmitir 100% do pulso de entrada no núcleo 1 para o núcleo 2 (ou de 2 para 1), desde que seu comprimento de acoplamento mínimo seja  $L_C = \pi/2\kappa$  [5].

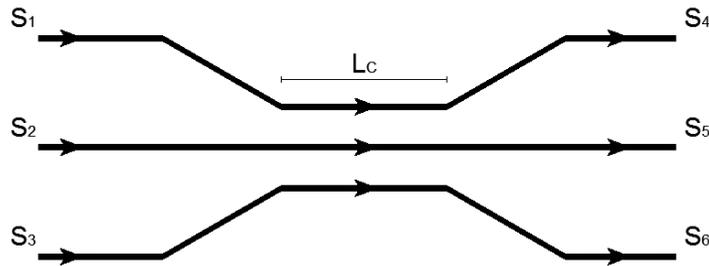
### 3.2 Acoplador Triplo Simétrico

Vários estudos teóricos têm mostrado que, em comparação com acopladores direcionais não lineares de dois núcleos (2C-NLDCs), os acopladores de três núcleos (3C-NLDCs) têm mais estados de saída, características de comutação mais agudas e maior sensibilidade aos estados de entrada, sendo essas características de grande importância em esquemas de comutação totalmente ópticos [6, 28, 29, 30].

Acopladores triplos são dispositivos de 6 portas (três de entrada e três de saída, veja a figura 4), composto por três guias de onda fisicamente separadas (no caso de fibras convencionais), ou uma única fibra com três núcleos (no caso de PCFs). Possui

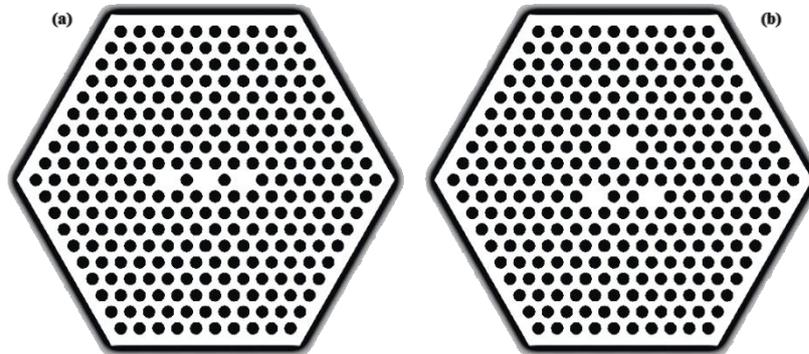
funcionamento semelhante ao de um acoplador duplo no que diz respeito à transferência de energia, guiamento e chaveamento dos pulsos inseridos. Os modelos de acoplador triplo mais comuns são: o acoplador triplo planar (três núcleos alinhados em arranjo paralelo equidistante, veja figura 5 a)), e o acoplador triplo triangular (três núcleos dispostos em forma de um triângulo equilátero, veja figura 5 b)).

**Figura 4.** Modelo esquemático de um acoplador triplo. O acoplador tem 3 portas de entrada ( $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ ) e 3 portas de saída ( $S_4$ ,  $S_5$  e  $S_6$ ). O comprimento de acoplamento é dado por  $L_C$ .



Fonte: [5].

**Figura 5.** Modelos de acoplador triplo de PCF mais comuns. (a) Acoplador triplo planar. (b) Acoplador triplo triangular.



Fonte: [5].

Nesses acopladores a potência crítica,  $P_C$ , é determinada pelos pontos de interseção das curvas de transmissão de energia entre guias e está diretamente relacionada com os parâmetros de dispersão de velocidade de grupo,  $\beta_2$ , não linearidade referente à auto modulação de fase,  $\gamma$ , e coeficiente de acoplamento,  $\kappa$ . Varia também com o arranjo dos núcleos [31]. De fato, para um acoplador triplo de comprimento  $L_C$ , um pulso de potência de pico igual à potência crítica,  $P_C$ , inserido em  $S_1$ , é dividido de forma que a potência nas saídas  $S_4$ ,  $S_5$  e  $S_6$  são de aproximadamente  $0,33P_C$ ,  $0,33P_C$  e  $0,33P_C$  (três partes iguais) para o

arranjo triangular e  $0,46P_C$ ,  $0,46P_C$  e  $0,08P_C$ , respectivamente, para o arranjo planar [31]. Os comportamentos do chaveamento quando acima ou abaixo da potência crítica são semelhantes aos observados nos acopladores duplos.

### 3.3 Acoplador Triplo Simétrico Planar

#### 3.3.1 Equações de modos acoplados

Para o modelo de acoplador triplo simétrico aqui analisado, a transferência de potência óptica entre os três núcleos pode ser descrita por três equações de modo acoplado. Devido ao arranjo planar dos núcleos, os modos dos pulsos nos núcleos 1 e 3 não interagem entre si. As equações de modo acoplado não linear, obtidas a partir da Equação Não Linear de Schrödinger (NLSE), para o acoplador direcional simétrico não linear triplo planar são dadas por:

$$i \frac{\partial a_1}{\partial z} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 a_1}{\partial t^2} - i \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 a_1}{\partial t^3} + \gamma(|a_1|^2 + \eta|a_2|^2)a_1 + i \frac{\gamma}{\omega} \frac{\partial(|a_1^2|a_1)}{\partial t} - \gamma a_1 T_R \frac{\partial |a_1|^2}{\partial t} + \kappa_0(a_2) + i \kappa_1 \frac{\partial(a_2)}{\partial t} = 0 \quad (3.8)$$

$$i \frac{\partial a_2}{\partial z} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 a_2}{\partial t^2} - i \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 a_2}{\partial t^3} + \gamma(|a_2|^2 + \eta|a_1 + a_3|^2)a_2 + i \frac{\gamma}{\omega} \frac{\partial(|a_2^2|a_2)}{\partial t} - \gamma a_2 T_R \frac{\partial |a_2|^2}{\partial t} + \kappa_0(a_1 + a_3) + i \kappa_1 \frac{\partial(a_1 + a_3)}{\partial t} = 0 \quad (3.9)$$

$$i \frac{\partial a_3}{\partial z} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 a_3}{\partial t^2} - i \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 a_3}{\partial t^3} + \gamma(|a_3|^2 + \eta|a_2|^2)a_3 + i \frac{\gamma}{\omega} \frac{\partial(|a_3^2|a_3)}{\partial t} - \gamma a_3 T_R \frac{\partial |a_3|^2}{\partial t} + \kappa_0(a_2) + i \kappa_1 \frac{\partial(a_2)}{\partial t} = 0 \quad (3.10)$$

onde  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  são as amplitudes dos envelopes dos pulsos inseridos nos núcleos 1, 2 e 3 respectivamente;  $z$  é a distância ao longo da fibra;  $t$  é a coordenada de tempo em relação ao tempo de trânsito dos pulsos;  $\beta_2$  é a dispersão de velocidade de grupo (GVD) e  $\beta_3$  é a dispersão de terceira ordem (TOD);  $\gamma$  é o parâmetro de não linearidade referente à auto modulação de fase (SPM);  $T_R$  é o coeficiente de espalhamento Raman;  $\eta$  é uma taxa referente a modulação de fase cruzada (XPM) em relação à SPM;  $\kappa_0$  é o coeficiente de acoplamento e  $\kappa_1$  é o coeficiente de dispersão de acoplamento, dado por  $\kappa_1 = d\kappa_0/d\omega$  [32].

### 3.3.2 Transmissão e comprimento de acoplamento

Considerando um acoplador de pequeno comprimento, simétrico e de núcleos idênticos, bombeado com pulsos de baixa potência e de mesma fase inicial, temos então a seguinte equação de modos acoplados:

$$\frac{\partial a_1}{\partial z} = i\kappa a_2 \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial a_2}{\partial z} = i\kappa a_1 + i\kappa a_3 \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial a_3}{\partial z} = i\kappa a_2 \quad (3.13)$$

Resolvendo analiticamente este sistema de equações diferenciais obtemos que, para um pulso na forma normalizada inserido apenas no núcleo 1, teremos:

$$\begin{bmatrix} \frac{\cos(\sqrt{2}\kappa z) + 1}{2} & \frac{i\sqrt{2} \sin(\sqrt{2}\kappa z)}{2} & \frac{\cos(\sqrt{2}\kappa z) - 1}{2} \\ \frac{i\sqrt{2} \sin(\sqrt{2}\kappa z)}{2} & \cos(\sqrt{2}\kappa z) & \frac{i\sqrt{2} \sin(\sqrt{2}\kappa z)}{2} \\ \frac{\cos(\sqrt{2}\kappa z) - 1}{2} & \frac{i\sqrt{2} \sin(\sqrt{2}\kappa z)}{2} & \frac{\cos(\sqrt{2}\kappa z) + 1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos(\sqrt{2}\kappa z) + 1}{2} \\ \frac{i\sqrt{2} \sin(\sqrt{2}\kappa z)}{2} \\ \frac{\cos(\sqrt{2}\kappa z) - 1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

onde a transmissão no núcleo 1 é dada por:  $T_1^2 = \frac{1}{4}(\cos(\sqrt{2}\kappa z) + 1)^2$ . Assim, a mínima transmissão ocorre em  $T_1^2 = 0$ , logo:

$$L_C = \frac{\pi}{\sqrt{2}\kappa} + \frac{2n\pi}{\sqrt{2}\kappa}, \text{ com } n = 0, 1, 2, \dots \quad (3.15)$$

Como os núcleos 1 e 3 são simétricos estes possuem os mesmos valores de transmissão e  $L_C$ . Assim, o acoplador triplo planar é capaz de transmitir 100% do pulso de entrada no núcleo 1 para os núcleos 2 ou 3 (ou de 3 para 1 ou 2) se seu comprimento de acoplamento for de no mínimo de  $L_C = \pi/\sqrt{2}\kappa$  [5].

Para um pulso na forma normalizada inserido apenas no núcleo 2, teremos:

$$\begin{bmatrix} \frac{\cos(\sqrt{2}\kappa z) + 1}{2} & \frac{i\sqrt{2} \sin(\sqrt{2}\kappa z)}{2} & \frac{\cos(\sqrt{2}\kappa z) - 1}{2} \\ \frac{i\sqrt{2} \sin(\sqrt{2}\kappa z)}{2} & \cos(\sqrt{2}\kappa z) & \frac{i\sqrt{2} \sin(\sqrt{2}\kappa z)}{2} \\ \frac{\cos(\sqrt{2}\kappa z) - 1}{2} & \frac{i\sqrt{2} \sin(\sqrt{2}\kappa z)}{2} & \frac{\cos(\sqrt{2}\kappa z) + 1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{i\sqrt{2} \sin(\sqrt{2}\kappa z)}{2} \\ \cos(\sqrt{2}\kappa z) \\ \frac{i\sqrt{2} \sin(\sqrt{2}\kappa z)}{2} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

onde a transmissão em 2 é dada por  $T_2^2 = (\cos(\sqrt{2}\kappa z))^2$ . Assim, a mínima transmissão ocorre em  $T_2^2 = 0$ , logo:

$$L_C = \frac{\pi}{2\sqrt{2}\kappa} + \frac{n\pi}{\sqrt{2}\kappa}, \text{ com } n = 0, 1, 2, \dots \quad (3.17)$$

Portanto, o acoplador triplo planar é capaz de transmitir 100% do pulso de entrada no núcleo 2 para os núcleos 1 ou 3 se seu comprimento de acoplamento for de no mínimo de  $L_C = \pi/2\sqrt{2}\kappa$  [5].

Como pode-se observar a partir dos resultados de transmissão e comprimento de acoplamento, para os três núcleos do acoplador triplo planar, é impossível que se obtenha, ao mesmo tempo,  $T_1 = T_2 = T_3 = 0$ . Desta forma, quando lidando com este tipo de acoplador devemos considerar dois possíveis valores de  $L_C$ . Para um acoplador com comprimento de acoplamento  $L_C = \pi/\sqrt{2}\kappa$ , obtemos  $T_1 = T_3 = 0$  e  $T_2 = 1$ , logo um pulso óptico inserido no núcleo 1 ou 3 pode ser completamente chaveado para os outros núcleos, mas um pulso inserido em 2 emergirá na saída deste mesmo núcleo com 100% de sua energia. Para um acoplador com comprimento de acoplamento  $L_C = \pi/2\sqrt{2}\kappa$ , obtemos  $T_2 = 0$  e  $T_1 = T_3 = 1/2$ , logo um pulso óptico inserido em 2 pode ser completamente chaveado para 1 ou 3, mas um pulso inserido em 1 ou 3 chaveará no máximo 50% de sua potência para os outros núcleos [5].

## 4 METODOLOGIA

Dados os conhecimentos teóricos exibidos até aqui, agora discutimos sobre as características e propriedades dos materiais e dispositivos a serem utilizados, além da metodologia empregada na obtenção do dispositivo final.

### 4.1 Fibra de Cristal Fotônico

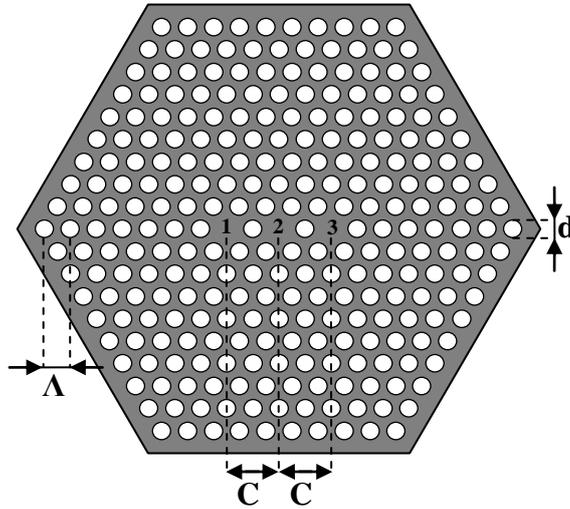
Existem, até hoje, vários estudos sobre a aquisição de portas lógicas totalmente ópticas, seja por meio de acopladores, interferômetros ou guias de onda [1, 2, 33, 34]. A maioria dos dispositivos ópticos propostos para operações lógicas usando acopladores de fibra convencionais tem comprimentos de acoplamento que podem variar de algumas unidades até dezenas de metros [3, 4, 6] e podem, portanto, ocupar grandes espaços na construção de circuitos complexos. A utilização de PCFs oferece uma redução considerável nos comprimentos de acoplamento, alcançando os mesmos resultados com apenas alguns centímetros de fibra [1]. Estes comprimentos de acoplamento podem ser ainda menores dependendo dos parâmetros físicos e do padrão da matriz de buracos na PCF [35, 36].

### 4.2 Modelo de Acoplador

Como mostrado em [32], [36] e [37], uma PCF pode atuar como um acoplador direcional não-linear feito completamente de fibra. Ademais, vários estudos teóricos tem mostrado que, em comparação com acopladores direcionais não lineares de dois núcleos (2C-NLDCs), os acopladores de três núcleos (3C-NLDCs) têm mais estados de saída, características de comutação mais agudas e maior sensibilidade aos estados de entrada, sendo essas características de grande importância em esquemas de comutação totalmente ópticos [6, 28, 29, 30].

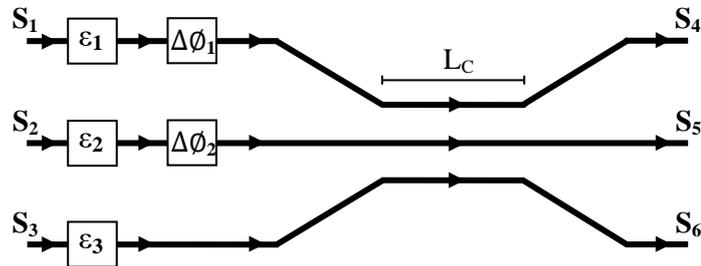
O modelo de acoplador aqui empregado consiste numa PCF de três núcleos sólidos simétricos em arranjo planar. Na PCF (veja a Figura 6), a matriz esburacada possui três núcleos sólidos paralelos separados por uma distância  $C$ , distância entre os buracos  $\Lambda$  e diâmetro de buraco  $d$ . Os núcleos são bastante próximos, de modo que os modos fundamentais de propagação de cada núcleo se sobrepõem parcialmente na região de revestimento entre os dois núcleos ao longo de todo o comprimento de acoplamento  $L_C$ .

**Figura 6.** Esquemático da seção transversal da PCF empregada. Aqui,  $C$  é a distância entre dois núcleos adjacentes,  $d$  é o diâmetro de buraco e  $\Lambda$  é a distância entre buracos. Os núcleos são enumerados como 1, 2 e 3 e são organizados como mostrado.



**Fonte:** [38].

**Figura 7.** Esquemático do acoplador estudado. Os blocos  $\varepsilon$  são os moduladores de amplitude,  $\Delta\phi$  são os controladores de fase e  $L_c$  é o comprimento de acoplamento. Presume-se que o controlador de fase seja composto por uma linha de atraso totalmente óptica.



**Fonte:** [38].

No modelo de acoplador utilizado (veja figura 7), os pulsos inseridos nas portas de entrada  $S_1$ ,  $S_2$ , e  $S_3$  são modulados em PAM-ASK como bits 1 ou 0 e então passam através do acoplador, resultando nas portas de saída  $S_4$ ,  $S_5$ , e  $S_6$ . Para a modulação dos pulsos de entrada no acoplador, usamos 3 moduladores de amplitude,  $\varepsilon$ , e 2 controladores de fase,  $\Delta\phi$ , dispostos como mostrado na Fig. 7.

### 4.3 Modulação PAM-ASK

A maioria dos sistemas digitais de ondas de luz emprega a modulação ASK porque os pulsos transmitidos nas fibras ópticas devem ter um comprimento de onda próximo de  $\lambda = 1,55 \mu m$  (e, portanto, uma frequência fixa) para minimizar perdas. Utilizando uma

secante hiperbólica  $A(z, t)$  com amplitude  $A_{REF}$  e parâmetro de modulação  $\varepsilon$  como pulso de referência, o pulso é modulado na forma  $A_b(0, t) = [A_{REF} + (-1)^{1-b}\varepsilon]\text{sech}(\frac{t}{\tau})$ , onde  $b$  é o bit desejado (0 ou 1). Assim, o pulso zero (representando o bit  $b = 0$ ) é dado por  $A_0(0, t) = (A_{REF} - \varepsilon)\text{sech } t$  e o pulso um (representando o bit  $b = 1$ ) é dado por  $A_1(0, t) = (A_{REF} + \varepsilon)\text{sech } t$ . O pulso de referência é dado por  $A_{REF}(0, t) = A_{REF}\text{sech } t$ .

Para a análise dos pulsos de saída, observamos a amplitude de saída  $A_{OUT}$  de cada sinal. Consideramos como bit 1 os sinais cuja amplitude é maior que a amplitude de referência  $A_{REF}$  e como bit 0 os sinais cuja amplitude é menor que  $A_{REF}$ . Na situação em que o sinal de saída tem uma amplitude igual a  $A_{REF}$ , consideramos este sinal como tendo um nível lógico indefinido.

#### 4.4 Método Numérico

Os parâmetros físicos do acoplador são: diâmetro de buraco de  $d = 2 \mu m$ , distância buraco a buraco de  $\Lambda = d/0,9$ , separação entre núcleos adjacentes de  $C = 2\Lambda$ , comprimento de onda próximo à região de  $\lambda = 1,55 \mu m$  e área efetiva de  $A_{eff} = 41 \mu m^2$ . Os parâmetros de PCF utilizados foram  $\kappa = 87,266$ ,  $\beta_2 = -47 ps^2/km$ ,  $\beta_3 = 0,1 ps^3/km$ ,  $\gamma = 3,2 \times 10^{-3} Wm^{-1}$  e  $\gamma/\omega = 2,6 \times 10^{-18} s/Wm$  [35, 36].

As equações de modo acoplado foram resolvidas usando o método Runge-Kutta de 4ª ordem. Utilizamos um passo de  $h = 0,00001$  e uma janela de tempo de 7385,254 fs divididos em 512 pontos. A janela de referencia move-se com o pulso na velocidade de grupo ( $v_g$ ) e o tempo é dado por  $t = t' - z/v_g$ . Utilizamos a propagação de soliton fundamental [ $L_{ND} = L_D$ ] com um pulso de entrada de máxima largura temporal a meia altura (TFWHM) de  $\Delta t = 100 fs$ . Desprezamos a dispersão de quarta ordem e as perdas na fibra devido ao pequeno comprimento de propagação (regime de perdas insignificantes). Na modulação, usamos um parâmetro de modulação de  $|\varepsilon| = 6W^{1/2}$ . A potência de pico do pulso de referência é  $P_{REF} = 4,64 kW$  e a amplitude de referência é dada por  $A_{REF} = \sqrt{P_{REF}}$ .

No modelo de acoplador utilizado, ao inserir pulsos de baixa intensidade, e desprezando a dispersão em pequenos comprimentos de propagação, verificamos que a transmissão é periódica com o comprimento da fibra. O comprimento de acoplamento,  $L_C$ , é o comprimento no qual a transmissão de energia entre as portas de entrada e saída de um

mesmo núcleo é mínima. Como mostrado na seção 3.3.2, em regime linear, acopladores triplos planares possuem dois comprimentos de acoplamentos diferentes. Para pulsos inseridos nos núcleos 1 ou 3, a transmissão  $T$  é dada por  $T^2 = \frac{1}{4}(\cos(\sqrt{2}\kappa z) + 1)^2$ , assim o mínimo comprimento de acoplamento é de  $L_C = \pi/\sqrt{2}\kappa \cong 2,54 \text{ cm}$ . Por outro lado, para pulsos inseridos no núcleo 2, a transmissão  $T$  é dada por  $T^2 = (\cos(\sqrt{2}\kappa z))^2$ , assim o mínimo comprimento de acoplamento é de  $L_C = \pi/2\sqrt{2}\kappa \cong 1,27 \text{ cm}$  [5].

Assim, a fim de encontrar portas lógicas no menor comprimento possível, testamos comprimentos de acoplador limitados pelo menor valor de  $L_C$  e encontramos portas lógicas em  $L = 1,08 \text{ cm}$  e  $L = 1,2 \text{ cm}$ . Analisamos todos os sinais de saída para todas as possíveis combinações de entrada. Destes, destacamos as portas OR e AND de duas e três entradas e escolhemos as melhores baseadas na razão de contraste (CR) entre os bits 0 e 1 no pior caso.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

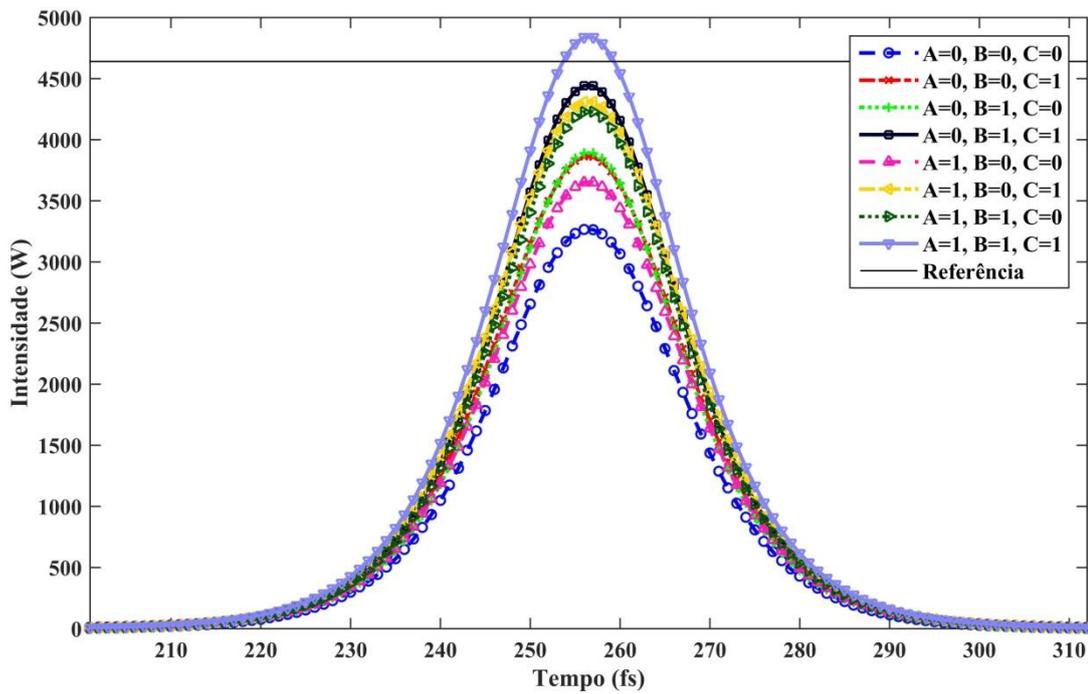
Utilizando um parâmetro de modulação de  $|\varepsilon| = 6 W^{1/2}$ , acopladores com comprimentos de  $L \leq 1,27 \text{ cm}$  e os controladores de fase  $\Delta\phi_1$  e  $\Delta\phi_2$  variando de 0 a  $2\pi$  em 41 pontos, inserimos no acoplador pulsos de forma  $A_b(0, t) = [A_{REF} + (-1)^{1-b}\varepsilon]\text{sech}(\frac{t}{\tau})$  modulados em PAM como bits 1 ou 0. Os pulsos foram inseridos nas portas de entrada  $S_1$ ,  $S_2$ , e  $S_3$  em todas as possíveis combinações de entrada na tabela verdade, e resultaram nas portas de saída  $S_4$ ,  $S_5$ , e  $S_6$ . Na demodulação dos sinais de saída, consideramos como bit 1 os sinais com amplitude maior que a amplitude de referência  $A_{REF}$  e como bit 0 os sinais com amplitude menor que  $A_{REF}$ . Desta forma obtivemos então dois dispositivos: o primeiro, com  $L = 1,08 \text{ cm}$ , resultando nas portas lógicas passivas de três entradas OR (A, B, C) e AND (A, B, C), e o segundo, com  $L = 1,2 \text{ cm}$ , resultando nas portas lógicas ativas de duas entradas OR (A, B) e AND (A, B) [38]. Aqui, A, B e C representam os estados lógicos dos sinais de entrada no acoplador para os núcleos 1, 2 e 3 respectivamente.

### 5.1 Primeiro Dispositivo

Para o primeiro dispositivo, uma PCF de três núcleos em arranjo planar com um comprimento de  $L = 1,08 \text{ cm}$ , diâmetro de buraco de  $d = 2 \mu\text{m}$ , distância entre buracos de  $\Lambda \cong 2,22 \mu\text{m}$  e separação entre núcleos adjacentes de  $C \cong 4,44 \mu\text{m}$ , obtivemos, como saída do núcleo 3, as portas lógicas passivas de três entradas OR(A, B, C) e AND(A, B, C), onde a operação lógica desejada (AND ou OR) é selecionada ajustando as fases dos pulsos de entrada. Esta é a primeira vez que portas passivas de três entradas são demonstradas quando considerando-se acopladores de PCF com modulação PAM/ASK [38].

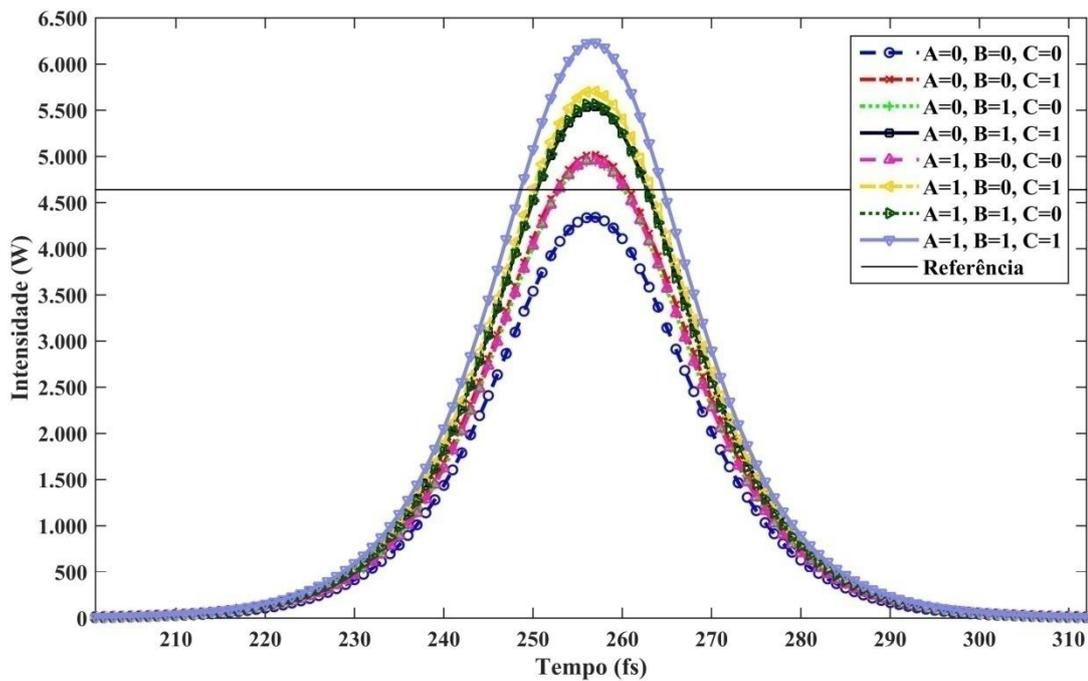
A porta lógica passiva de três entradas OR(A, B, C), (cujos sinais de saída são mostrados na Figura 8) é obtida com os parâmetros  $\Delta\phi_1 = 1,0495\pi$  e  $\Delta\phi_2 = 0,0975\pi$ . Observe que o pulso de saída para a entrada 000 é o único que está abaixo da linha de referência, conforme o esperado a partir da tabela de verdade desta porta lógica. A porta lógica passiva de três entradas AND(A, B, C), (cujos sinais de saída são mostrados na Figura 9) é obtida com os parâmetros  $\Delta\phi_1 = 0,901\pi$  e  $\Delta\phi_2 = 0,799\pi$ . Observe que o pulso de saída para a entrada 111 é o único que está acima da linha de referência, conforme o esperado a partir da tabela verdade desta porta lógica. Ambas as portas lógicas foram obtidas na saída  $S_6$  (núcleo 3) [38].

**Figura 15.** Pulsos de saída para a porta lógica passiva de três entradas AND(A, B, C) obtida no dispositivo de  $L = 1,08 \text{ cm}$ .



Fonte: [38].

**Figura 14.** Pulsos de saída para a porta lógica passiva de três entradas OR(A, B, C) obtida no dispositivo de  $L = 1,08 \text{ cm}$ .



Fonte: [38].

A Tabela 1 contém alguns dados para a análise das portas lógicas AND(A, B, C) e OR(A, B, C): a tabela verdade, os parâmetros de modulação dos sinais de saída, e a razão de contraste, CR, para cada saída. O parâmetro de modulação de pulso de saída  $\epsilon_{OUT}$  é a diferença entre a amplitude do sinal de saída analisado e a amplitude de referência.  $\epsilon_{OUT}$  é negativo para o estado lógico 0 e positivo para o estado lógico 1. A razão de contraste é calculada por  $CR = 10 \log_{10}(P/P_R)$ , onde  $P$  é a potência de pico para cada caso e  $P_R$  é a potência de pico para comparação, que depende do tipo de porta lógica analisada. Para a porta OR,  $P_R$  é a potência de pico do pulso de referência cuja saída é bit 0, enquanto que para a porta AND,  $P_R$  é a potência de pico do pulso de referência cuja saída é bit 1 [39]. No pior caso, a razão de contraste entre os sinais de saída 0 e 1 é de 0,553 dB para a porta OR(A, B, C) e 0,364 dB para a porta AND(A, B, C). Como em ambos os casos CR é maior que 0,3 dB, há margem suficiente para distinguir o sinal lógico do ruído nos detectores ópticos.

**Tabela 1:** Tabela de verdade, parâmetros de modulação de saída e razões de contraste para os sinais de saída das portas lógicas passivas de três entradas AND(A, B, C) e OR(A, B, C).

Input			OR(A, B, C)			AND(A, B, C)		
A	B	C	Output	$\epsilon_{OUT} (W^{1/2})$	CR (dB)	Output	$\epsilon_{OUT} (W^{1/2})$	CR (dB)
0	0	0	0	-2,246	0,000	0	-10,969	1,700
0	0	1	1	2,713	0,619	0	-5,973	0,972
0	1	0	1	2,182	0,553	0	-5,732	0,939
0	1	1	1	6,300	1,048	0	-1,462	0,364
1	0	0	1	2,281	0,565	0	-7,686	1,215
1	0	1	1	7,401	1,175	0	-2,452	0,494
1	1	0	1	6,501	1,071	0	-3,079	0,577
1	1	1	1	10,832	1,561	1	1,445	0,000

Fonte: [38].

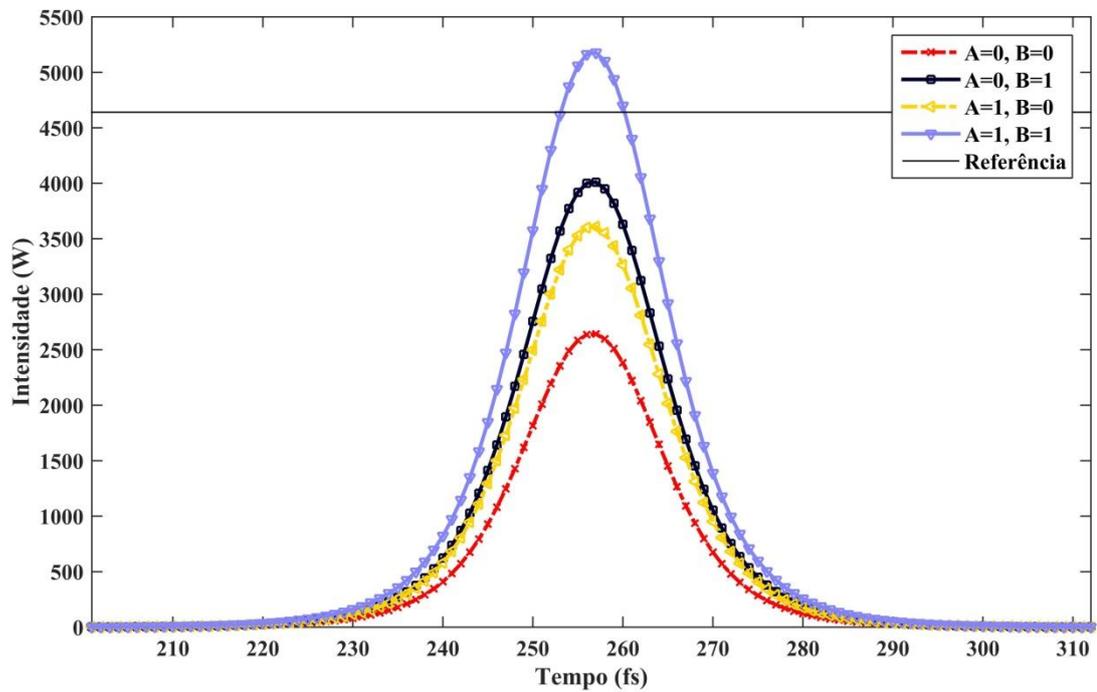
## 5.2 Segundo Dispositivo

Como estamos lidando com um acoplador com 3 entradas e 3 saídas, além das portas lógicas de três entradas, também é possível obter portas lógicas de duas entradas. Nestas portas, apenas duas entradas serão efetivamente utilizadas, sendo a terceira uma entrada de habilitação (ou sinal de controle, como visto em [2] e [6]), o que é muito comum em circuitos lógicos integrados eletrônicos. As portas lógicas mostradas abaixo recebem os pulsos de entrada nos núcleos 1 e 2 enquanto o pulso de habilitação é inserido no núcleo 3. Aqui, o pulso de habilitação é uma secante hiperbólica com potência de pico de  $4,676 \text{ kW}$  e TFWHM de  $100 \text{ fs}$  [38].

Assim, para o segundo dispositivo, uma PCF de três núcleos em arranjo planar com um comprimento de  $L = 1,2 \text{ cm}$ , diâmetro de buraco de  $d = 2 \mu\text{m}$ , distância entre buracos de  $\Lambda \cong 2,22 \mu\text{m}$  e separação entre núcleos de  $C \cong 4,44 \mu\text{m}$ , obtivemos, como saída do núcleo 3, as portas lógicas ativas de duas entradas OR(A, B) e AND(A, B), onde a operação lógica desejada (AND ou OR) é selecionada ajustando as fases dos pulsos de entrada.

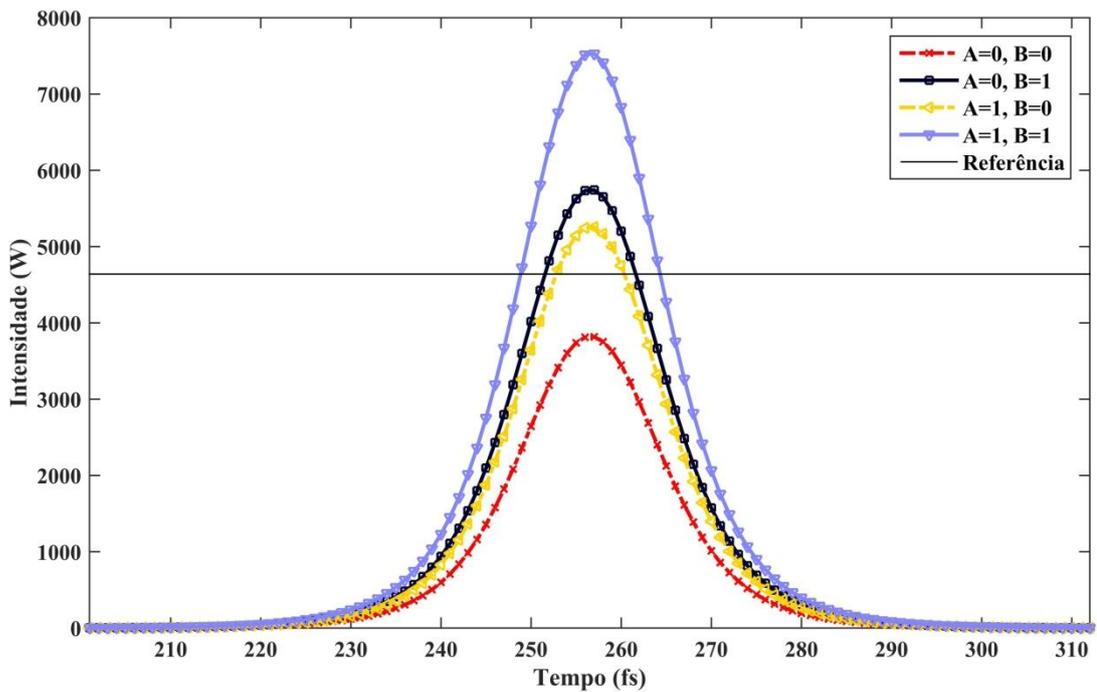
A porta lógica ativa de duas entradas OR(A, B), (cujos sinais de saída são mostrados na Figura 10) é obtida com os parâmetros  $\Delta\phi_1 = 2\pi$  e  $\Delta\phi_2 = 0,4545\pi$ . Observe que o pulso de saída da entrada 00 é o único que está abaixo da linha de referência, conforme o esperado a partir da tabela de verdade desta porta lógica. A porta lógica ativa de duas entradas AND(A, B), (cujos sinais de saída são mostrados na Figura 11) é obtida com os parâmetros  $\Delta\phi_1 = 0,297\pi$  e  $\Delta\phi_2 = 0,4525\pi$ . Observe que o pulso de saída para a entrada 11 é o único que está acima da linha de referência, conforme o esperado a partir da tabela de verdade desta porta lógica. Ambas as portas lógicas foram obtidas na saída  $S_6$  (núcleo 3) [38].

**Figura 10.** Pulsos de saída para a porta lógica ativa de duas entradas AND(A, B) obtida no dispositivo de  $L = 1,2 \text{ cm}$ .



Fonte: [38].

**Figura 11.** Pulsos de saída para a porta lógica ativa de duas entradas OR(A, B) obtida no dispositivo de  $L = 1,2 \text{ cm}$ .



Fonte: [38].

A Tabela 2 contém alguns dados para a análise das portas lógicas AND(A, B) e OR(A, B): a tabela de verdade, os parâmetros de modulação dos sinais de saída e a razão de contraste “CR” para cada saída. No pior caso, a razão de contraste entre os sinais de saída 0 e 1 é de 1,387 dB para a porta OR(A, B) e 1,109 dB para a porta AND(A, B). Como em ambos os casos CR é maior que 0,3 dB, há margem suficiente para distinguir o sinal lógico do ruído nos detectores ópticos.

**Tabela 2:** Tabela de verdade, parâmetros de modulação de saída e razões de contraste para os sinais de saída das portas lógicas ativas de duas entradas AND(A, B) e OR(A, B).

Input		OR(A, B)			AND(A, B)		
A	B	Output	$\epsilon_{OUT} (W^{1/2})$	CR (dB)	Output	$\epsilon_{OUT} (W^{1/2})$	CR (dB)
0	0	0	-6,336	0,000	0	-16,717	2,922
0	1	1	7,658	1,773	0	-4,785	1,109
1	0	1	4,360	1,387	0	-8,051	1,569
1	1	1	18,652	2,950	1	3,841	0,000

Fonte: [38].

### 5.3 Comparação com outros trabalhos

Em [40], foi realizado um trabalho pouco semelhante no qual PCFs com núcleos sólidos de sílica e núcleos ocos preenchidos de clorofórmio são utilizadas como acopladores triplos planar e triangular. Os acopladores possuíam comprimentos da ordem de  $L = 1,2 \text{ mm}$ , diâmetro de buraco de  $d = 1,332 \mu\text{m}$ , distância entre buracos de  $\Lambda \cong 2 \mu\text{m}$  e separação entre núcleos de  $C \cong 4 \mu\text{m}$ , sendo bombeados por pulsos de baixa potência de  $400 \text{ fs}$ . Uthayakumar reportou a obtenção numérica das portas lógicas duplas ativas OR, NOR, AND, NAND, X-OR, X-NOR e NOT com taxas de contraste baixas quando utilizando acopladores triplos triangular de núcleos ocos preenchidos de clorofórmio. Aqui, embora uma diversidade de portas de duas entradas tenham sido obtidas, portas com três sinais de entrada não foram exploradas.

Em [2], foram investigadas portas ativas no acoplador triplo triangular de comprimento  $L = 1,8 \text{ cm}$  (aqui considerado como o comprimento de acoplamento), diâmetro

de buraco de  $d = 2 \mu m$ , distância entre buracos de  $\Lambda \cong 2,22 \mu m$  e separação entre núcleos de  $C \cong 6,66 \mu m$  é bombeado por pulsos solitônicos de  $100 fs$  com potência de pico de  $P = 4,56 kW$  modulados em PAM-ASK. O modelo de acoplador utilizado em [2] possui dois moduladores de amplitude,  $\varepsilon$ , localizados nas guias 1 e 2 (extremidades) e um modulador de fase,  $\Delta\emptyset$ , localizado na guia 1. A guia central (guia 3) é dedicada exclusivamente como guia de controle. Usando um parâmetro de modulação de  $|\varepsilon| = 9W^{1/2}$ , e considerando os efeitos não lineares de auto modulação de fase (SPM), dispersão de velocidade de grupo (GVD), dispersão de terceira ordem (TOD), espalhamento Raman e modulação de fase cruzada (XPM), Coelho demonstrou a obtenção de portas lógicas duplas ativas OR e AND com taxas de contraste razoáveis, mas não explorou a possibilidade de aumentar o processamento aproveitando todos os núcleos para guiar o sinal.

Em [41], foi realizado um trabalho bastante semelhante ao mostrado em [2], onde um acoplador triplo planar de mesmo tamanho ( $L = 1,8 cm$ ,  $d = 2 \mu m$ ,  $\Lambda \cong 2,22 \mu m$  e  $C \cong 6,66 \mu m$ ) e estrutura (possui dois moduladores de amplitude,  $\varepsilon$ , um modulador de fase,  $\Delta\emptyset$ , e uma guia de controle, idêntico ao modelo utilizado em [2]) é bombeado por pulsos solitônicos de  $100 fs$  com potência de pico de  $P = 4,56 kW$  modulados em PAM-ASK. Usando um parâmetro de modulação de  $|\varepsilon| = 10W^{1/2}$ , e considerando os efeitos não lineares de automodulação de fase (SPM), dispersão de velocidade de grupo (GVD) e dispersão de terceira ordem (TOD), Bastos demonstrou a obtenção de várias portas lógicas duplas ativas OR e AND com taxas de contraste razoáveis.

Nesses trabalhos os autores demonstram a obtenção de portas lógicas enquanto utilizando o comprimento de acoplamento do acoplador duplo ( $L_C = \pi/2\kappa = 1,8 cm$ ), sem variá-lo, com objetivo de serem fiéis às condições apresentadas em [36]. Isso reduziu o espaço de busca nas simulações aos valores possíveis dos controladores de amplitude,  $\varepsilon$ , e fase,  $\Delta\emptyset$ . No trabalho aqui apresentado, apesar de utilizarmos o mesmo tipo de acoplador usado em [41], e a mesma modulação usada em [2, 41] obtemos as portas lógicas triplas passivas AND e OR e as portas lógicas duplas ativas OR e AND com altas taxas de contraste. Isso se deve, principalmente, à utilização de uma nova metodologia que favorece fatores que aumentam a capacidade de processamento dos dispositivos. A modificação na metodologia, onde estabelecemos o comprimento do acoplador como sendo limitado pelo acoplamento de acoplamento ( $L_C = \pi/2\sqrt{2}\kappa = 1,27 cm$ , para o acoplador triplo planar), contribui para o

melhoramento das portas. A razão dessa melhoria está em três fatos que merecem ser destacados:

- Os efeitos não-lineares também são dependentes do comprimento. A prova desse fato é demonstrada por [36] e discutida em [22];
- A inserção de mais um grau de liberdade no projeto do dispositivo permite melhores soluções a custo de um maior esforço computacional (devido ao aumento do espaço de busca). No entanto, esse custo é viável dada à melhoria que pode ser atingida;
- Apesar de outros parâmetros poderem ser inseridos no design de acopladores, tal como perfil de não-linearidade (podendo melhorar o desempenho dos dispositivos), o ajuste no comprimento do dispositivo é uma alternativa mais simples de ser implementada experimentalmente e muito eficiente, como foi demonstrado nesse trabalho.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, demonstramos numericamente a aquisição de dois dispositivos totalmente ópticos que realizam as operações lógicas OR e AND usando um acoplador de PCF de três núcleos em arranjo planar e pulsos solitônicos modulados em PAM-ASK. No primeiro dispositivo, de  $L = 1,08 \text{ cm}$ , encontramos as portas lógicas passivas de três entradas OR(A, B, C) e AND(A, B, C). Já no segundo dispositivo, de  $L = 1,2 \text{ cm}$ , utilizamos o núcleo 3 como porta de controle (que recebeu um sinal de entrada de habilitação) resultando nas portas lógicas ativas de duas entradas OR(A, B) e AND(A, B). Todas as portas lógicas foram obtidas na saída  $S_6$  (núcleo 3) do acoplador.

Uma vez que a maioria dos sistemas de ondas de luz digitais empregam ASK (devido à necessidade de manter o comprimento de onda dos pulsos em  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$  para minimizar as perdas) a aquisição de dispositivos ópticos que funcionam usando a modulação PAM-ASK é de grande interesse. Todas as portas lógicas mostradas aqui têm razões de contraste superiores a  $0,3 \text{ dB}$ , tendo assim uma margem significativa para distinguir o sinal lógico do ruído nos detectores ópticos. As portas lógicas ativas de duas entradas obtidas no segundo dispositivo apresentaram razões de contraste excepcionalmente altas, com  $1,3869 \text{ dB}$  para a porta OR e  $1,1091 \text{ dB}$  para a porta AND. Devido às suas altas razões de contraste, estas portas lógicas são mais eficientes se comparadas a outros trabalhos na literatura onde a modulação PAM-ASK é usada para obter portas lógicas totalmente óticas feitas de PCF [1, 2].

As portas lógicas de três entradas obtidas no primeiro dispositivo são um resultado interessante por serem menores que as portas lógicas de duas entradas obtidas neste e em vários outros trabalhos da literatura onde são utilizadas fibras convencionais e PCFs [1, 2, 3, 4, 6, 7]. Esse menor comprimento permite economizar recursos e espaço físico na criação de circuitos ópticos mais complexos (nos quais a ocorrência de expressões booleanas como OR(A, B, C) e AND(A, B, C) é muito comum). Por exemplo, usando apenas portas OR de duas entradas, seriam necessárias de 2 portas OR cascadeadas para obter a expressão lógica OR(A, B, C) como saída, o que ocupa mais espaço e tem uma considerável perda de energia devido à transição através das duas portas. Assim, usando uma porta lógica OR de três entradas, podemos economizar espaço e evitar os problemas que surgem com o cascadeamento de portas lógicas na construção de circuitos ópticos mais complexos.

## 7 PUBLICAÇÕES RELACIONADAS

Artigos completos aceitos e publicados em revistas internacionais:

- MARTINS, F. L. B. et al. Two and three-input all-optical logic gates on a planar three-core photonic crystal fiber. **Optik-International Journal for Light and Electron Optics**, v. 154, p. 516-523, 2018.
- DE LIMA, Alanio Ferreira et al. Critical Power in Three-Core Photonic Crystal Fibers. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, v. 54, n. 2, p. 1-7, 2018.

## **8 PERSPECTIVAS FUTURAS**

Nos assuntos relacionados ao trabalho aqui apresentado pretendemos ainda, em trabalhos futuros, realizar estudos mais aprofundados quanto às características de transmissão e chaveamento de outros modelos de acopladores simétricos e assimétricos (4, 5 e 6 núcleos, em vários arranjos diferentes) sob regime aproximadamente linear e continuar a busca por dispositivos factíveis capazes de realizar operações lógicas cada vez mais complexas e eficientes.

## 9 REFERÊNCIAS

- [1] ARAÚJO, Antônio et al. Two all-optical logic gates in a single photonic interferometer. **Optics Communications**, v. 355, p. 485-491, 2015.
- [2] COELHO JR, A. G. et al. Realization of all-optical logic gates in a triangular triple-core photonic crystal fiber. **Journal of lightwave technology**, v. 31, n. 5, p. 731-739, 2013.
- [3] DE ALMEIDA, J. S. et al. Logic gates based in asymmetric couplers: Numerical analysis. **Fiber and integrated optics**, v. 26, n. 4, p. 217-228, 2007.
- [4] FERRANDO, A. et al. Nearly zero ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers. **Optics Letters**, v. 25, n. 11, p. 790-792, 2000.
- [5] MARTINS, F. L. B. **Estudo dos efeitos não lineares e acoplamento em fibras de cristal fotônico**. 2016. 61 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Bloco das Engenharias, Universidade Federal do Ceará - Campus Mucambinho, Sobral, 2016.
- [6] MENEZES, J. W. M. et al. Optical switches and all-fiber logical devices based on triangular and planar three-core nonlinear optical fiber couplers. **Optics communications**, v. 276, n. 1, p. 107-115, 2007.
- [7] SOUSA, J. R. R. et al. Generation of logic gates based on a photonic crystal fiber Michelson interferometer. **Optics Communications**, v. 322, p. 143-149, 2014.
- [8] KNIGHT, J. C. et al. Anomalous dispersion in photonic crystal fiber. **IEEE photonics technology letters**, v. 12, n. 7, p. 807-809, 2000.
- [9] SAITOH, Kunimasa et al. Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion. **Optics Express**, v. 11, n. 8, p. 843-852, 2003.
- [10] SANG, Xinzhu; CHU, Pak L.; YU, Chongxiu. Applications of nonlinear effects in highly nonlinear photonic crystal fiber to optical communications. **Optical and Quantum Electronics**, v. 37, n. 10, p. 965-994, 2005.
- [11] BIRKS, Tim A.; KNIGHT, Jonathan C.; RUSSELL, P. St J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber. **Optics letters**, v. 22, n. 13, p. 961-963, 1997.
- [12] KNIGHT, J. C. et al. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding. **Optics letters**, v. 21, n. 19, p. 1547-1549, 1996.
- [13] KNIGHT, Jonathan C. et al. Photonic band gap guidance in optical fibers. **Science**, v. 282, n. 5393, p. 1476-1478, 1998.
- [14] ZOGRAFOPOULOS, Dimitrios C. et al. Guided-wave liquid-crystal photonics. **Lab on a chip**, v. 12, n. 19, p. 3598-3610, 2012.

- [15] KHAN, Kaisar R.; BIDNYK, Serge; HALL, Trevor J. Tunable all optical switch implemented in a liquid crystal filled dual-core photonic crystal fiber. **Progress In Electromagnetics Research**, v. 22, p. 179-189, 2012.
- [16] POLI, F. et al. Tailoring of flattened dispersion in highly nonlinear photonic crystal fibers. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 16, n. 4, p. 1065-1067, 2004.
- [17] FERREIRA, Alisson da C. et al. A performance study of an all-optical logic gate based in PAM-ASK. **Journal of Modern Optics**, v. 56, n. 8, p. 1004-1013, 2009.
- [18] BRODERICK, N. G. R. et al. Nonlinearity in holey optical fibers: measurement and future opportunities. **Optics Letters**, v. 24, n. 20, p. 1395-1397, 1999.
- [19] KNIGHT, J. C. et al. Large mode area photonic crystal fiber. **Optics and Photonics News**, v. 9, n. 12, p. 34-35, 1998.
- [20] FINAZZI, Vittoria; MONRO, Tanya M.; RICHARDSON, David J. Small-core silica holey fibers: nonlinearity and confinement loss trade-offs. **JOSA B**, v. 20, n. 7, p. 1427-1436, 2003.
- [21] ORTIGOSA-BLANCH, Arturo et al. Ultrahigh birefringent nonlinear microstructured fiber. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 16, n. 7, p. 1667-1669, 2004.
- [22] DE LIMA, Alanio Ferreira et al. Critical Power in Three-Core Photonic Crystal Fibers. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, v. 54, n. 2, p. 1-7, 2018.
- [23] HANSEN, Theis P. et al. Highly birefringent index-guiding photonic crystal fibers. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 13, n. 6, p. 588-590, 2001.
- [24] SHEN, L. P. et al. Design and optimization of photonic crystal fibers for broad-band dispersion compensation. **IEEE photonics technology letters**, v. 15, n. 4, p. 540-542, 2003.
- [25] WU, Tzong-Lin; CHIANG, Jung-Sheng; CHAO, Chia-Hsin. A novel approach for calculating the dispersions of photonic crystal fibers. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 16, n. 6, p. 1492-1494, 2004.
- [26] CHIANG, Kin Seng. Propagation of short optical pulses in directional couplers with Kerr nonlinearity. **JOSA B**, v. 14, n. 6, p. 1437-1443, 1997.
- [27] AGRAWAL, Govind P.; HAUS, Hermann A. Applications of nonlinear fiber optics. **Physics Today**, v. 55, n. 6, p. 58, 2002.
- [28] DA SILVA, Marcio Gomes; SOMBRA, Antonio Sergio Bezerra. All-optical soliton switching in three-core nonlinear fiber couplers. **Optics communications**, v. 145, n. 1-6, p. 281-290, 1998.

- [29] SOTO-CRESPO, Jose M.; WRIGHT, E. M. All-optical switching of solitons in two-and three-core nonlinear fiber couplers. **Journal of applied physics**, v. 70, n. 12, p. 7240-7243, 1991.
- [30] STEGEMAN, G. I.; WRIGHT, E. M. All-optical waveguide switching. **Optical and Quantum Electronics**, v. 22, n. 2, p. 95-122, 1990.
- [31] LEE, Sungchul et al. All-optical exclusive NOR logic gate using Mach-Zehnder interferometer. **Japanese journal of applied physics**, v. 41, n. 10B, p. L1155, 2002.
- [32] CHIANG, Kin S. Intermodal dispersion in two-core optical fibers. **Optics letters**, v. 20, n. 9, p. 997-999, 1995.
- [33] KNIGHT, Jonathan C. Photonic crystal fibres. **Nature**, v. 424, n. 6950, p. 847, 2003.
- [34] ZENG, Shunquan et al. Ultrasmall optical logic gates based on silicon periodic dielectric waveguides. **Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications**, v. 8, n. 1, p. 32-37, 2010.
- [35] KHAN, Kaisar R. et al. Soliton switching and multi-frequency generation in a nonlinear photonic crystal fiber coupler. **Optics Express**, v. 16, n. 13, p. 9417-9428, 2008.
- [36] LIU, M.; CHIANG, Kin Seng. Propagation of ultrashort pulses in a nonlinear two-core photonic crystal fiber. **Applied Physics B**, v. 98, n. 4, p. 815-820, 2010.
- [37] KERRINCKX, Emmanuel et al. Photonic crystal fiber design by means of a genetic algorithm. **Optics Express**, v. 12, n. 9, p. 1990-1995, 2004.
- [38] MARTINS, F. L. B. et al. Two and three-input all-optical logic gates on a planar three-core photonic crystal fiber. **Optik-International Journal for Light and Electron Optics**, v. 154, p. 516-523, 2018.
- [39] LIU, Qiang et al. All-optical half adder based on cross structures in two-dimensional photonic crystals. **Optics express**, v. 16, n. 23, p. 18992-19000, 2008.
- [40] UTHAYAKUMAR, T.; RAJA, R. Vasantha Jayakantha; PORSEZIAN, K. Realization of all-optical logic gates through three core photonic crystal fiber. **Optics Communications**, v. 296, p. 124-131, 2013.
- [41] BASTOS, Agliberto M. **Estudo de acopladores de fibra óptica tradicional e de cristal fotônico e aplicações: geração de portas lógicas e sensores de corrente elétrica**. 2015. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Teleinformática) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.