



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO (PPGEEC)

JOÃO PAULO TEÓFILO RODRIGUES

OBTENÇÃO DE PORTAS LÓGICAS TOTALMENTE ÓPTICAS USANDO REDES
NEURAIS

SOBRAL

2019

JOÃO PAULO TEÓFILO RODRIGUES

OBTENÇÃO DE PORTAS LÓGICAS TOTALMENTE ÓPTICAS USANDO REDES
NEURAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação (PPGEEC) da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica e de Computação. Área de Concentração: Sistema de Informação

Orientador: Prof. Dr. José Cláudio do Nascimento

SOBRAL

2019

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)

R613o Rodrigues, João Paulo Teófilo.
Obtenção de portas lógicas totalmente ópticas usando redes neurais / João Paulo Teófilo Rodrigues. – 2019.
64 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Sobral, 2019.
Orientação: Prof. Dr. José Cláudio do Nascimento.

1. Fibra de Cristal Fotônico. 2. Acoplador. 3. Porta lógica. 4. Rede Neural. I. Título.

CDD 621.3

JOÃO PAULO TEÓFILO RODRIGUES

OBTENÇÃO DE PORTAS LÓGICAS TOTALMENTE ÓPTICAS USANDO REDES
NEURAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação (PPGEEC) da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica e de Computação. Área de Concentração: Sistema de Informação

Aprovada em: 18 de Dezembro de 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Cláudio do Nascimento (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jarbas Joaci de Mesquita Sá Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Paulo Régis Menezes Sousa
Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA)

À minha querida Maria Claudine Dias Aragão,
por sua forte contribuição em minha vida!

AGRADECIMENTOS

A Deus, Lei e Legislador do Universo!

Ao Prof. Dr. José Cláudio do Nascimento pela oportunidade, apoio e empenho dedicado à elaboração deste trabalho de mestrado.

Aos Membros da banca: Prof. Dr. Jarbas Joaci de Mesquita Sá Júnior e Prof. Dr. Paulo Régis Menezes de Sousa, por suas valiosas contribuições.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação (PPGEEC).

À Secretaria de Educação do Estado do Ceará (SEDUC/Ce), pelo afastamento para estudos de mestrado.

Aos meus pais, Maria Eugênia Rodrigues e Felizardo Rodrigues de Carvalho (*in memorian*), meus irmãos, Herly Teófilo Rodrigues, Francisco Teófilo Rodrigues, Sueli Teófilo Rodrigues, Alexsandro Teófilo Rodrigues e Doralice Teófilo Rodrigues, por acreditarem em mim, e em especial à minha querida Maria Claudine Dias Aragão, por todo amor e gratidão, em minha memória até o fim de meus dias.

Aos amigos do mestrado, Francisco Leonardo Martins Bezerra, Raimundo Farrapo Pinto Júnior, Danilo Alves Oliveira e Ismael Araújo Ramos, pela amizade e dias de luta no laboratório do PPGEEC.

Agradeço a todos os professores do PPGEEC.

Ao Doutorando em Engenharia Elétrica, Ednardo Moreira Rodrigues, e seu assistente, Alan Batista de Oliveira, aluno de graduação em Engenharia Elétrica, pela adequação do *template* utilizado neste trabalho para que o mesmo ficasse de acordo com as normas da biblioteca da Universidade Federal do Ceará (UFC).

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, muito obrigado.

“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos”.

(Isaac Newton)

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a utilização de redes neurais Perceptrons Multicamadas (MLPs) (do inglês *Multilayer Perceptrons*) para estudar a relação entre os parâmetros físicos e as características lógicas de uma Fibra de Cristal Fotônico (PCF). A modulação usada foi a Modulação por Amplitude de Pulso (PAM) (do inglês *Pulse Amplitude Modulation*) e Chaveamento *On-Off* (OOK) (do inglês *On-Off Keying*). Neste problema, as variações de combinações específicas dos valores de parâmetros físicos determinam os pulsos lógicos de saídas desta PCF. Tais combinações foram analisadas por uma rede neural MLPs, e esta foi capaz de classificar com precisão as características físicas que determinam a ocorrência da porta lógica OR. A rede neural é capaz de identificar portas lógicas específicas com base apenas nos parâmetros físicos que geram estas saídas. Os resultados obtidos mostram que a rede neural é capaz de aprender o comportamento periódico e as relações existentes entre os parâmetros físicos: constante de acoplamento κ , comprimento de propagação z e parâmetro de modulação de amplitude m . Das expressões booleanas analisadas, destaca-se a porta lógica OR, cujos sinais foram classificados com precisão de 98,71%. Desta forma, a análise e os resultados descritos sobre este dispositivo de acoplamento demonstram que a RNA proposta é capaz de reconhecer relações entre os parâmetros físicos e os sinais de saída de um dispositivo lógico de PCF e que as MLPs são ferramentas de grande importância e eficiência para o reconhecimento destes padrões, auxiliando os sistemas de transmissão de telecomunicações.

Palavras-chave: Acoplador. Fibra de Cristal Fotônico. Porta lógica. Rede Neural.

ABSTRACT

This work presents a study on the use of neural networks MLPs (from English *Multilayer Perceptrons*) to study the relationship between the physical parameters and the logical characteristics of a PCF. The modulation used was PAM (from English *Pulse Amplitude Modulation*) and OOK (from English *On-Off Keying*). In this problem, the variations of specific combinations of the values of physical parameters determine the logic pulses of outputs of this PCF. Such combinations were analyzed by a neural network MLPs, and this was able to accurately classify the physical characteristics that determine the occurrence of the OR logic gate. The neural network is able to identify specific logic gates based only on the physical parameters that generate these outputs. The obtained results show that the neural network is able to learn the periodic behavior and the existing relationships between the physical parameters: coupling constant κ , propagation length z and amplitude modulation parameter m . Of the Boolean expressions analyzed, the OR logic gate stands out, whose signals were classified with a precision of 98,71%. In this way, the analysis and the results described on this coupling device demonstrate that the proposed RNA is capable of recognizing relationships between the physical parameters and the output signals of a PCF logical device and that MLPs are tools of great importance and efficiency for the recognition of these patterns, helping telecommunication transmission systems.

Keywords: Artificial Neural Network. Coupler. Logic gate. Photonic Crystal Fiber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cristais Fotônicos em uma, duas e três dimensões	21
Figura 2 – Seção transversal, ilustrativa, das primeiras PCFs, constituídas de núcleo sólido (a), e núcleo oco (b).	22
Figura 3 – Seção transversal de uma PCF com núcleo sólido.	23
Figura 4 – Seção transversal de uma PCF. Representação dos parâmetros geométricos diâmetro dos furos de ar d e, distância entre os furos de ar Λ	24
Figura 5 – (a) Representação de uma PCF de núcleo sólido. (b) Imagem microscópica de uma PCF de núcleo sólido.	26
Figura 6 – (a) Representação de uma PCF de núcleo oco. (b) Imagem microscópica de uma PCF de núcleo oco.	27
Figura 7 – Representação da dispersão da luz no núcleo de uma PCF. Na Figura 7a a dispersão é nula e em 7b a dispersão é positiva.	30
Figura 8 – Arquitetura de uma rede perceptron de multicamadas com duas camadas ocultas	34
Figura 9 – Seção transversal de uma PCF de dois núcleos sólidos e simétricos. As áreas brancas são furos com ar e as áreas cinzas são constituídas de sílica.	38
Figura 10 – Representação de um acoplador duplo e simétrico de 4 portas, comprimento de acoplamento L_C , distância entre os núcleos C e raio dos núcleos ρ	38
Figura 11 – Seção transversal de dois acopladores triplos de núcleos sólidos e simétricos: a) Acoplador Triplo Planar e b) Acoplador Triplo Triangular	41
Figura 12 – a) Representação de um acoplador triplo, simétrico, de 6 portas, comprimento de acoplamento L_C , distância entre os núcleos C , b) Arranjo planar, c) Arranjo triangular.	41
Figura 13 – Representação da seção transversal da PCF de três núcleos sólidos estudada neste trabalho a), e em b) seção lateral do modelo de acoplador proposto.	47
Figura 14 – a) Representação da seção transversal da PCF de dois núcleos sólidos estudada neste trabalho e, b) seção lateral do modelo de acoplador proposto.	51
Figura 15 – Seção transversal e representação das saídas nos núcleos S_3 e S_4 da PCF. a) OR-OR, b) A-B, c) B-A	52
Figura 16 – Representação das saídas da porta lógica OR em 3D em função de κ , z e m	55
Figura 17 – Representação 2D da combinação lógica OR-OR (Asteriscos), A-B (pontos vermelhos) e B-A (pontos pretos) com amplitude fixa.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Representação da base de dados: parâmetros κ , z , m e das classes.	53
Tabela 2 – Registros dos resultados das simulações realizadas com os classificadores bayesianos LDA e QDA.	54
Tabela 3 – Taxa de acertos da MLP aplicada à base de dados do acoplador duplo simétrico em 4 simulações	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GVD	Dispersão de Velocidade de Grupo
MLPs	Perceptrons Multicamadas
NLDC	Acoplador Direcional Não-linear
NLSE	equação não-linear de Schrödinger
OOK	Chaveamento <i>On-Off</i>
PAM	Modulação por Amplitude de Pulso
PAM-ASK	Modulação por Amplitude de Pulso com deslocamento de Amplitude
PCF	Fibra de Cristal Fotônico
SPM	Automodulação de Fase
TOD	Dispersão de Terceira Ordem
XPM	Modulação de Fase Cruzada

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{REF}	Amplitude de Referência.
α	Coefficiente de atenuação da fibra óptica.
η	Coefficiente de relação entre os efeitos XPM e SPM.
L	Comprimento da fibra.
L_C	Comprimento de acoplamento.
λ	Comprimento de onda.
η_{NL}	Comprimento de onda não-linear.
z	Comprimento de propagação.
κ_{ij}	Constante de acoplamento da fibra i em relação a fibra j .
β	Constante de propagação.
dB	Decibéis.
d	Diâmetro dos buracos de ar.
β_2	Dispersão de velocidade de grupo.
β_3	Dispersão de terceira ordem.
D_g	Dispersão geométrica.
D_m	Dispersão material.
Λ	Espaçamento entre os buracos de ar.
fs	Femtosegundos.
n_1	Índice de refração do núcleo da PCF.
n_2	Índice de refração da casca da PCF.
$\Delta\phi$	Controlador de fase.
ε	Parâmetro de modulação.
m	Parâmetro de modulação de amplitude.
A	Porta A (Expressão Booleana).
B	Porta B (Expressão Booleana).
OR	Porta lógica OR.

P	Potência máxima para os pulsos ópticos.
P_R	Potência máxima do pulso óptico de referência.
P_C	Potência crítica.
C_R	Relação de Contraste entre os pulsos ópticos.
t	Tempo.
c	Velocidade da luz no vácuo.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa	18
1.2	Objetivo Geral	18
1.2.1	<i>Objetivos Específicos</i>	18
1.3	Organização da Dissertação	18
2	FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO	20
2.1	Cristais Fotônicos	20
2.2	Fibra de Cristal Fotônico	22
2.2.1	<i>Geometria das PCFs</i>	24
2.2.2	<i>Fibra de Cristal Fotônico de Núcleo Sólido</i>	25
2.2.3	<i>Fibra de Cristal Fotônico de Núcleo Oco</i>	27
2.2.4	<i>Propriedades e aplicações das PCFs</i>	28
2.2.5	<i>Efeitos Não-lineares em PCFs (Não-linearidade e Dispersão)</i>	29
2.3	Equações de Maxwell	32
2.4	Rede Neural Perceptron de múltiplas camadas (MLP – multilayer perceptron)	33
3	ACOPLADORES DE FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO	36
3.1	Acopladores duplos de PCFs	37
3.2	Acopladores Triplos de PCFs	40
3.3	Portas lógicas totalmente ópticas em acopladores de PCFs	45
3.3.1	<i>Acoplador Triplo Planar de PCF</i>	46
3.3.2	<i>Estudo do Acoplador Triplo Planar</i>	46
3.3.3	<i>Método Numérico</i>	48
4	RECONHECIMENTO DE PORTAS LÓGICAS EM ACOPLADORES DE PCFS	50
4.1	Estudo do acoplador duplo simétrico proposto	50
4.2	Método Numérico	51
4.3	Resultados	53
4.3.1	<i>Análise do comportamento da Porta lógica OR</i>	54
4.3.2	<i>Análise da Rede MLPs</i>	57

4.4	Conclusão	58
5	PUBLICAÇÕES RELACIONADAS E TRABALHOS FUTUROS	59
5.1	Publicações relacionadas	59
5.2	Trabalhos Futuros	59
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade a luz vem sendo usada como meio de comunicação e transmissão de informações, e com a evolução humana surge a necessidade de criar, desenvolver e aprimorar os meios de comunicação, tornando-os cada vez mais rápidos visando melhorar o conforto e a vida em sociedade. Portanto, é indispensável o desenvolvimento de dispositivos de transmissão de dados e informações com maior velocidade e eficiência. Assim, a partir da década de 1970, o desenvolvimento da fibra óptica, bem como a grande disponibilidade de matéria-prima para sua fabricação, revolucionou os sistemas de telecomunicações. Além do mais, a transmissão de informações à velocidade da luz associada a baixas perdas durante a transmissão de sinais torna esta tecnologia uma alternativa viável às necessidades de altas taxas de transmissão de informações, indispensáveis ao avanço tecnológico do século XXI (AGRAWAL, 2012; PERNICE *et al.*, 2012).

Diante deste elevado desenvolvimento tecnológico, foram propostos diversos circuitos totalmente ópticos, ocasionando uma forte demanda por projetos ótimos e específicos (MANGAN *et al.*, 2000; OKUNO *et al.*, 1999). Conseqüentemente, surge uma nova classe de fibras que associa cristais fotônicos e fibras ópticas, chamada de fibra de cristal fotônico (PCF) - do inglês Photonic Crystal Fiber. As razões para seu estudo são as suas vantajosas e úteis propriedades estruturais associadas a baixas perdas de transmissão de sinais. Além disso, possuem características específicas de manipulação em seus parâmetros que resultam em uma variedade de propriedades que tornam estas fibras importantes para serem usadas com eficiência em diversas aplicações tecnológicas (VENGSARKAR *et al.*, 1996).

Este trabalho parte do conhecimento prévio sobre diversos estudos práticos e experimentais, usando simulações em computadores, que demonstram que é possível obter portas lógicas a partir de acopladores direcionais em fibras ópticas convencionais. Estes trabalhos também mostram que é possível a troca de energia entre os núcleos de uma PCF de dois ou três núcleos e, conseqüentemente, a obtenção dispositivos lógicos (MENEZES *et al.*, 2007; FRAGA *et al.*, 2006; CHIANG, 1997).

Neste contexto, destacam-se as PCFs. Seu diferencial é a possibilidade de manipular o índice de refração entre o núcleo e a casca variando os arranjos dos orifícios de ar e dos núcleos (POLI *et al.*, 2007). Essa variabilidade possibilita uma série de aplicações em diversas áreas do conhecimento. Assim, sua principal vantagem é a flexibilidade no design, pois variando as características geométricas de sua secção transversal, tamanho ou arranjos dos furos de

ar, podemos obter fibras com excelentes propriedades ópticas, sendo possível projetar PCFs controlando propriedades como dispersão e não-linearidade. Porém, a única desvantagem das PCFs é a atenuação, que é superior às fibras comuns (POLI *et al.*, 2007).

Com o objetivo de otimizar os projetos de PCFs, há diversas pesquisas que fazem o uso de inteligência artificial. Para isso, usam Algoritmos Genéticos (GAs) e Redes Neurais Artificiais (RNAs) (SOARES; SILVA, 2011; HAMEED *et al.*, 2008; RODRÍGUEZ-ESQUERRE *et al.*, 2013). Com essas técnicas conseguiram-se excelentes resultados, dentre os quais destacam-se: a otimização da modelagem dos projetos, melhorias na dispersão cromática em fibra microestruturada, previsão da relação de dispersão e de bandas fotônicas em cristais fotônicos 2D, solucionar problemas envolvendo busca e otimização de gap de banda fotônica (PBG). Além destes, descobriram estruturas cristalinas fotônicas que melhoram as propriedades ópticas e superam os melhores PCs projetados pelo homem (MALHEIROS-SILVEIRA; HERNANDEZ-FIGUEROA, 2012; MALHEIROS-SILVEIRA *et al.*, 2011; PREBLE *et al.*, 2005; KERRINCKX *et al.*, 2004).

Neste trabalho são apresentadas duas pesquisas. A primeira descreve a obtenção de portas lógicas AND e OR de duas e três entradas, totalmente ópticas, de alto desempenho e excelentes taxas de contrastes, isto é, superiores a 0,3 dB. Para obtê-las, simulou-se um acoplador de fibra de cristal fotônico (PCF) de três núcleos, em arranjo planar, operando com pulsos solitônicos de 100 fs modulados em PAM-ASK, visto que estes dispositivos são de grande importância, pois economizam espaço físico, possuem menores perdas de energia e menor tempo de processamento.

Na segunda parte do trabalho analisou-se a relação entre os parâmetros físicos e as combinações lógicas de saídas de uma PCF. Neste estudo, manipulou-se um acoplador duplo simétrico direcional de Fibra de Cristal Fotônico (PCF) utilizando redes neurais Perceptrons Multicamadas (MLPs). Desta forma, estudou-se a relação entre a combinação dos parâmetros físicos que determina as saídas lógicas de uma PCF de núcleo sólido, sob a modulação PAM e on-off (OOK). Tais combinações foram analisadas por uma rede MLP, e esta foi capaz de classificar e determinar com precisão de 98,71% as características físicas que determinam a ocorrência da porta lógica OR deste estudo. Isso mostra que as MLPs têm alto potencial para serem usadas com sucesso na classificação das relações entre as características físicas e lógicas de uma PCF.

1.1 Justificativa

Redes neurais têm sido bastante utilizadas em pesquisas de fibras ópticas por sua capacidade de lidar com problemas complexos e extrair padrões de dados não-lineares. Elas são capazes de lidar com grandes quantidades de dados, de descobrir padrões e características ocultas não identificadas usando métodos convencionais. Depois de treinadas, as redes neurais podem ser aplicadas a diferentes configurações de fibras ópticas e até mesmo a fibras com propriedades desconhecidas.

1.2 Objetivo Geral

Estudar e investigar a correlação entre os pulsos ópticos de saída de um acoplador duplo simétrico de fibra óptica e suas características físicas. Serão usadas técnicas de reconhecimento de padrões para investigar se existe um possível padrão entre os sinais lógicos e os parâmetros físicos da fibra.

1.2.1 *Objetivos Específicos*

- Projetar uma rede neural capaz de identificar portas lógicas específicas com base apenas nos parâmetros físicos que geram estas saídas;
- Identificar, entre diversas técnicas de reconhecimento de padrões, o melhor método capaz de aprender o comportamento periódico dos sinais de saídas de uma fibra e as relações existentes entre os parâmetros físicos classificando-os com o melhor nível de precisão possível.

1.3 Organização da Dissertação

Os capítulos deste trabalho estão organizados da seguinte forma:

- **Capítulo 1:** a primeira seção é a introdução do trabalho, nesta faz-se uma apresentação sobre a importância do estudo e desenvolvimento das PCFs para os sistemas de transmissão de informações. O capítulo também fala sobre a importância do uso de inteligência artificial para otimização de projetos de fibras. Além do mais, contém a justificativa, objetivo geral e objetivos específicos deste estudo;
- **Capítulo 2:** a segunda seção faz uma fundamentação sobre a Fibra de Cristal Fotônico

explicando os tipos de PCFs existentes, suas propriedades, efeitos e aplicações, além de um estudo sobre as Equações de Maxwell e Rede Neural Perceptron de Múltiplas Camadas - MLPs;

- **Capítulo 3:** a terceira seção faz um estudo sobre os acopladores duplos e triplos de PCFs, descrevendo suas propriedades, características e as equações de modo acoplado;
- **Capítulo 4:** a quarta seção, Reconhecimento de Portas Lógicas e Acopladores de PCFs, é a parte principal do trabalho. Ela apresenta a metodologia utilizada para descrever a relação entre as características físicas e lógicas de um acoplador duplo de PCF e a conclusão deste estudo;
- **Capítulo 5:** a última seção contém as publicações relacionadas ao trabalho e as pesquisas atuais para futuras submissões em revistas.

2 FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO

A enorme demanda por tráfego de informações iniciada no século XX motivou pesquisadores a estudarem e desenvolverem novas e mais eficientes técnicas de telecomunicações. Dentre estas, surge um novo tipo de fibra óptica chamada de fibra de cristal fotônico, baseada em um cristal fotônico hexagonal bidimensional contendo em sua estrutura orifícios de ar, também conhecida como fibra microestruturada ou *fibras de holey* (JR, 2010). Propostas na década de 1990, as PCFs despertaram o interesse da comunidade científica por suas excelentes propriedades ópticas. Sua capacidade de transmitir informações sob a forma de pulsos ópticos a longas distâncias é fundamental para o sucesso tecnológico e evolução das telecomunicações, assegurando alto nível na transmissão de sinais, dados, voz e vídeo à velocidade da luz. Além destas qualidades, a grande disponibilidade de matéria-prima (sílica- SiO_2), associada ao baixo custo de produção e à capacidade de transportar informações sem interferências elétricas ou magnéticas, faz das PCFs um excelente e confiável meio de comunicação. Além de telecomunicações, também são estudadas para uso em espectroscopia, microscopia, astronomia, micro-usinagem, biologia e sensoriamento remoto (POLI *et al.*, 2007).

2.1 Cristais Fotônicos

Os primeiros cristais fotônicos observados surgiram naturalmente numa evolução que levou milhões de anos. Sua estrutura é formada por materiais organizados periodicamente com diferentes índices de refração. A luz natural foi importante para a seleção e evolução de algumas espécies, selecionando uma diversidade de estruturas fotônicas naturais que serviram de inspiração às diversas aplicações tecnológicas que fazem uso das PCFs (VUKUSIC; SAMBLES, 2003).

Podemos citar vários exemplos de cristais fotônicos naturais. Entre eles há os que usam as estruturas periódicas e produzem efeitos bem peculiares. Tais características podem ser observadas em opalas (minerais compostos por cristais de sílica), estrelas do mar que (usam para coletar a luz), asas das borboletas Morpho (usam para produzir cores azuis) e alguns insetos (utilizam uma matriz de elementos, bidimensionais para diminuir a reflexão nos olhos). Contudo, além da existência destas características na natureza, os cristais fotônicos também podem ser criados artificialmente.

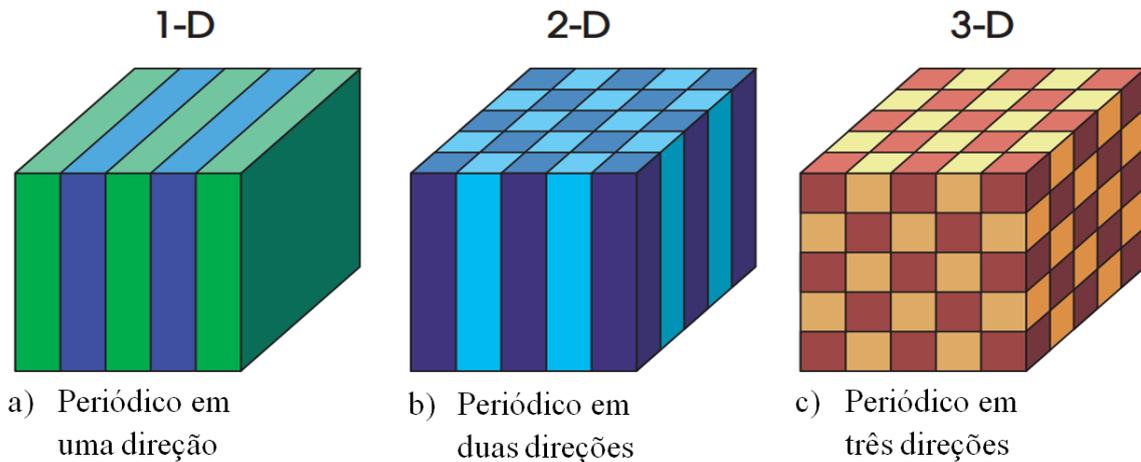
Entretanto, a principal característica e propriedade de interesse científico de um

crystal fotônico é a periodicidade do material dielétrico. Esta propriedade peculiar permite obter o controle sobre propriedades como propagação, emissão ou absorção da luz e dos elétrons (ASHCROFT, 2011), oferecendo uma nova maneira de guiar a luz, diferente da tradicional reflexão interna total das fibras ópticas convencionais. Neste caso, o fenômeno da reflexão interna da luz pode ser explicado pela solução das equações de Maxwell.

O potencial das propriedades ópticas dos cristais fotônicos despertou o interesse da comunidade científica para diversas aplicações tecnológicas tais como: dispositivos para guiamento de luz, nanolasers, fibras de cristal fotônico, chaveadores ópticos (INOUE; OHTAKA, 2004; PASCHOTTA *et al.*, 2008).

A variação periódica de um cristal fotônico permite classificá-los em três categorias: 1D, a variação periódica ocorre em uma dimensão; 2D, a variação periódica ocorre em duas dimensões; 3D, a variação periódica ocorre em três dimensões (VUKUSIC; SAMBLES, 2003; INOUE; OHTAKA, 2004). A Figura 1 apresenta exemplos de cristais fotônicos, na qual as cores representam materiais com diferentes constantes dielétricas.

Figura 1 – Cristais Fotônicos em uma, duas e três dimensões



Fonte: Crystals (2008).

As nanoestruturas dos cristais fotônicos permitem a manipulação da luz graças à organização de sua estrutura física em padrões periódicos. A disposição de sua estrutura interna permite a criação de uma região particular onde a luz não pode se propagar, são energias ou comprimentos de ondas dentro do material, onde os fótons não podem existir possibilitando criar um material que impede a irradiação da luz (JOANNOPOULOS *et al.*, 2008). Então, para assegurar o controle sobre a propagação da luz, já que não há reflexão interna total, manipula-se uma estrutura adequada ao projeto que se deseja. Desta forma, é possível criar no interior do

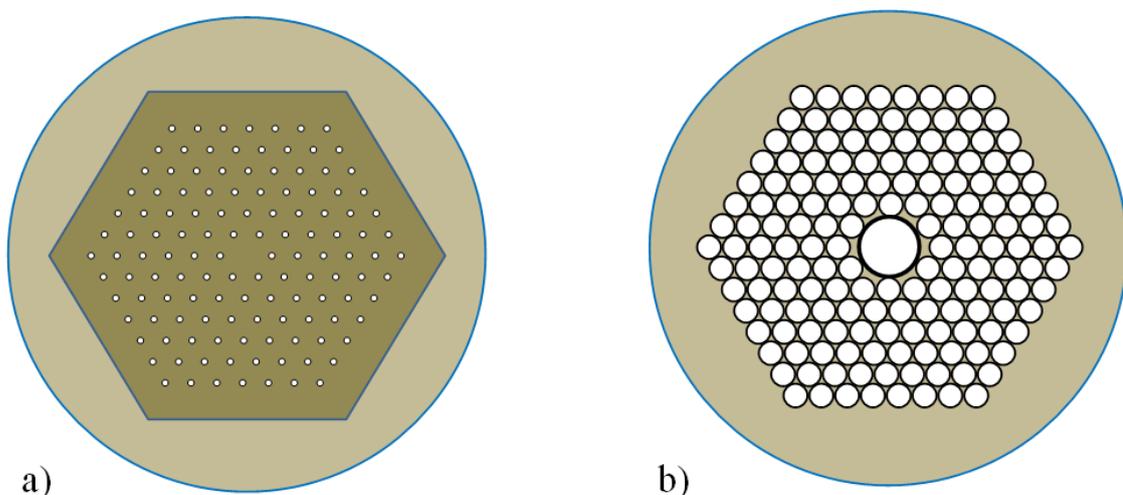
crystal uma gama de frequências chamada de *bandgap fotônico* (banda proibida), onde as ondas de luz não podem se propagar.

2.2 Fibra de Cristal Fotônico

As propriedades das fibras ópticas levaram pesquisadores de toda a comunidade científica a pesquisar e desenvolver um novo tipo de guia de ondas ópticos com características bem particulares e superiores às convencionais. Neste cenário, surge a PCF (do inglês *photonic crystal fiber*), constituída de sílica pura (SiO_2) não dopada, rodeada por um material de cristal fotônico (POLI *et al.*, 2007; KNIGHT *et al.*, 1996b).

O primeiro projeto de fibra com estrutura fotônica, ilustrado na Figura 2a, foi relatado por Philip Russel em 1995. Sua estrutura possuía núcleo sólido, diâmetro de furo de ar de 300 nm , espaçamento entre furos de $2,3\ \mu\text{m}$ e não havia *bandgap* fotônico para confinamento óptico, pois os buracos de ar eram muito pequenos para se obter uma grande fração de enchimento de ar, fundamentais para obter um PBG (KNIGHT *et al.*, 1996a). Depois de aperfeiçoar as técnicas de fabricação de PCF, em 1999, Russell e sua equipe desenvolveram a primeira fibra monomodo de núcleo oco, com espaçamento entre furos de $4,9\ \mu\text{m}$ e diâmetro do núcleo de $14,8\ \mu\text{m}$. Nestas fibras, o confinamento era devido ao *bandgap* fotônico (PBG bidimensional), como o ilustrado na Figura 2b (CREGAN *et al.*, 1999).

Figura 2 – Seção transversal, ilustrativa, das primeiras PCFs, constituídas de núcleo sólido (a), e núcleo oco (b).



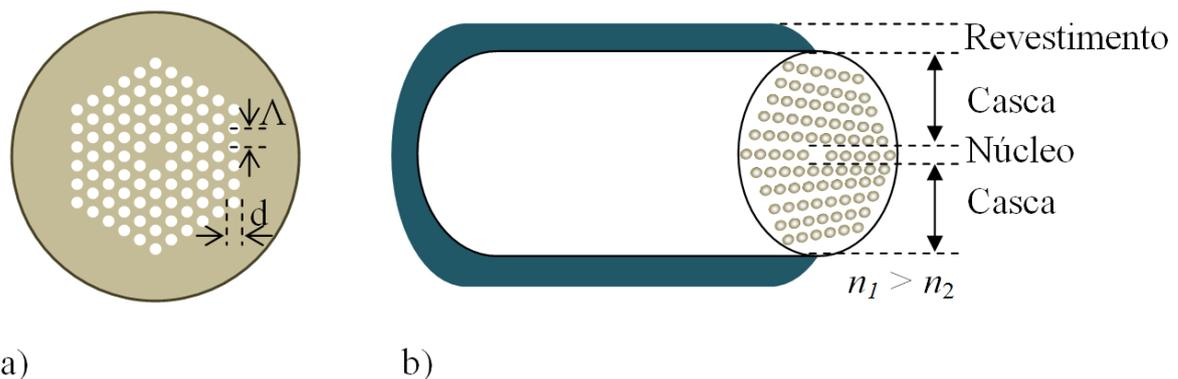
Fonte: Knight *et al.* (1996a). Adaptado pelo autor (2019).

As fibras micro-estruturadas de cristais fotônicos permitem o desenvolvimento de

dispositivos ópticos inovadores. Suas micro-estruturas são uma das características que permitem identificá-las, e como podemos observar nas Figuras 2a e 2b, são externamente muito semelhantes às fibras ópticas convencionais. A diferença está em sua estrutura, na qual há arranjos ordenados de buracos de ar, microscópicos, que percorrem toda a sua extensão formando uma matriz de furos de ar. Esta organização estrutural é um dos fatores que diferenciam as PCFs das fibras ópticas convencionais. Além do mais, as propriedades de guiamento das PCFs dependem destes arranjos estruturais, pois proporcionam a diferença entre os índices de refração do núcleo e da casca, essencial para o aprisionamento da luz nos núcleos da fibra. Neste caso, as propriedades de guia de luz são determinadas pelo diâmetro e arranjo dos furos de ar da fibra (KNIGHT *et al.*, 2000; SAITOH *et al.*, 2003). Isto significa que as PCFs permitem melhores ajustes de características fundamentais, como dispersão, não-linearidade e birrefringência do que em fibras convencionais (RUSSELL, 2007).

Para ilustrar as características desta fibras, na Figura 3a, tem-se a representação da matriz de buracos de ar de uma PCF de núcleo sólido e dos parâmetros físicos diâmetro dos buracos d , e o espaçamento entre os buracos de ar Λ . Na Figura 3b, destacou-se a matriz de buracos de ar e o revestimento externo da fibra. Entretanto, a condição essencial para que haja o aprisionamento e guia de luz no núcleo é que o índice de refração do núcleo (η_1) seja maior que o índice de refração da casca (η_2), isto é, ($\eta_1 > \eta_2$).

Figura 3 – Secção transversal de uma PCF com núcleo sólido.



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Como observado nas Figuras 3a e 3b, nas PCFs a região da casca é formada por uma estrutura de buracos de ar ordenados de forma periódica. Entretanto, no núcleo acontece a quebra desta periodicidade, isto é, a região do núcleo é constituída pelo próprio material da fibra e funciona como núcleo. Portanto, a PCF possui um núcleo sólido, constituído de sílica, onde a

luz é aprisionada e guiada. Já a diferença entre os índices de refração do núcleo e da casca é explicada pela presença de ar entre os furos da casca esburacada. Neste caso, os orifícios de ar da casca reduzem efetivamente o seu índice de refração, abaixo do índice de refração do núcleo de sílica (SLUSHER, 2003). Desta forma, o ar influencia diminuindo o índice de refração da casca, entretanto, no núcleo o índice de refração permanece constante.

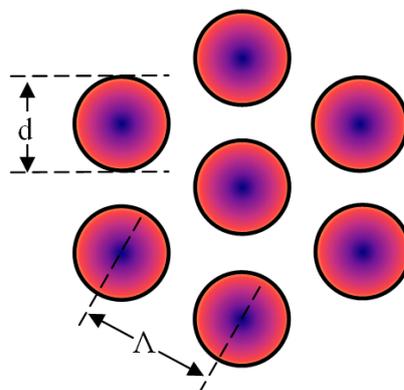
Outro fator relevante para qualquer tecnologia que utilize fibra óptica comum ou PCFs é o controle sobre os mecanismos de perdas. Mesmo com a grande redução das perdas em fibras ópticas convencionais, é necessário saber que estas fibras ainda apresentam perdas intrínsecas, perdas por confinamento e perda por flexão (POLI *et al.*, 2007).

2.2.1 Geometria das PCFs

A descoberta das PCFs foi importante, pois fortaleceu a parte mecânica das fibras e possibilitou o uso de novos graus de liberdade geométricos para manipular a dispersão em guias de ondas. Suas estruturas mais simples, Figuras 2a e 2b, são formadas por arranjos hexagonais de buracos de ar que se estendem por todo o comprimento da fibra, e o núcleo é representado por um defeito no centro da estrutura.

Envolvendo a fibra há um revestimento mais externo para proteger a região da casca e do núcleo. Na parte mais interna, a relação entre os parâmetros físicos (d/Λ) e (λ/Λ) , evidenciados na Figura 4, é de fundamental importância para o estudo das estruturas fotônicas, pois determinam as características que pretendemos obter numa PCF e está muito bem definida em (KUHLMEY *et al.*, 2002).

Figura 4 – Secção transversal de uma PCF. Representação dos parâmetros geométricos diâmetro dos furos de ar d e, distância entre os furos de ar Λ .



Fonte: Crystals (2008). Adaptado pelo autor (2019).

Nestas fibras, é importante destacar que suas matrizes periódicas de furos de ar e as proporções entre a geometria, diâmetro dos furos de ar (d), distância entre os furos de ar (Λ) e o comprimento de onda (λ) precisam ser preservadas. Portanto, a relação entre estes parâmetros é fundamental, pois o número de modos de propagação (trajetórias que os raios luminosos podem percorrer dentro da fibra óptica) suportados por uma PCF também depende das razões entre (d/Λ) e (λ/Λ). Neste caso, estas relações atuam reduzindo o índice de refração da sílica na região da casca que também é dependente destas correlações. Deste modo, pode-se observar que orifícios de ar maiores e mais espaçados reduzem o índice de refração da casca, resultando em um confinamento no modo mais apertado (AGRAWAL, 2000).

Este contraste entre os índices de refração do núcleo e da casca é que determina a GVD (Dispersão de Velocidade de Grupo). Entretanto, diferentemente do que ocorre nas fibras convencionais, o índice de refração da luz na casca vai depender do comprimento de onda da luz. Assim, nas PCFs, a GVD ocorre quando a luz tem seu comprimento de onda reduzido. Com isso, a tendência é a luz se concentrar mais na região do núcleo. Assim, o índice de refração da casca se altera, aproximando-se índice de refração do núcleo.

Portanto, as várias possibilidades de arranjo das propriedades de manipulação das características geométricas das PCFs superam as características das fibras ópticas convencionais, havendo um número crescente de aplicações em áreas cada vez mais amplas da ciência e tecnologia, fazendo destas fibras excelentes dispositivos para o controle da dispersão (FERRANDO *et al.*, 1999; FERRANDO *et al.*, 2001; POLI *et al.*, 2007).

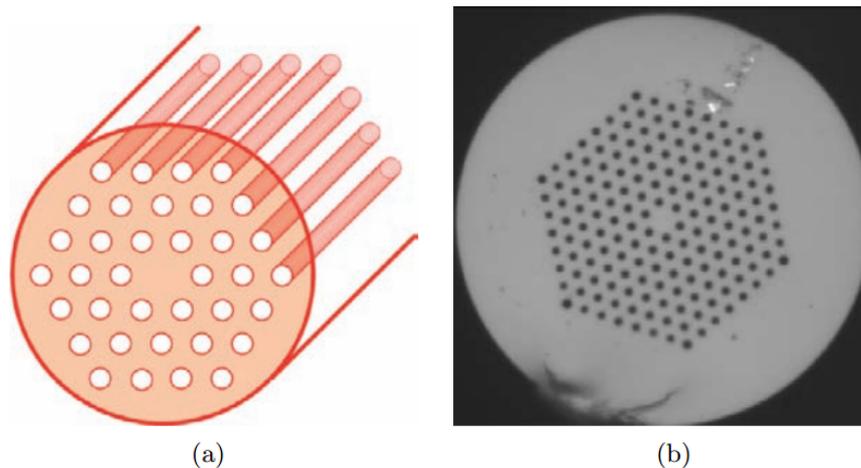
2.2.2 Fibra de Cristal Fotônico de Núcleo Sólido

Para que uma PCF funcione como mecanismo de guia de luz em telecomunicações ópticas, é necessário introduzir pulsos de luz no núcleo da fibra com um certo valor β , que é o componente da constante de propagação da fibra. O maior valor de β que pode existir em um meio homogêneo infinito com índice de refração η , é $\beta = \eta \kappa_0$, em que κ_0 é a constante de propagação. Desta forma, todos os valores menores de β são permitidos. Assim, um cristal fotônico bidimensional, como qualquer outro material, é caracterizado por um valor máximo de β que pode se propagar. Portanto, em um determinado comprimento de onda, isso corresponde ao modo fundamental de uma laje infinita do material, e esse valor β define o índice de refração efetivo do material (POLI *et al.*, 2007).

Os cristais fotônicos bidimensionais podem ser usados como revestimento de fibra.

Um exemplo desse tipo de estrutura está apresentado na Figura 5, na qual tem-se uma PCF de núcleo sólido constituída de sílica. A região em torno do núcleo é revestida por um cristal fotônico contendo uma estrutura triangular de buracos de ar. No núcleo, a luz é guiada através da reflexão interna total, porém modificada e suas propriedades são bem mais atrativas que das fibras ópticas convencionais.

Figura 5 – (a) Representação de uma PCF de núcleo sólido. (b) Imagem microscópica de uma PCF de núcleo sólido.



Fonte: Poli *et al.* (2007).

Diferentemente das fibras ópticas convencionais, em que o índice de refração efetivo é constante, nas PCFs de núcleo sólido o índice de refração efetivo varia de acordo com a ordem do comprimento de onda.

Nestas PCFs, o arranjo da estrutura dos buracos de ar gera contrastes entre os índices de refração do núcleo e da casca, permitindo que a luz seja guiada através do núcleo da fibra. Neste caso, a luz é guiada através do fenômeno da reflexão interna total, porém modificada, devido ao contraste entre os índices de refração do núcleo (η_1), com alto índice de refração e da casca (η_2), com baixo índice de refração (POLI *et al.*, 2007).

Consequentemente, nestas estruturas de núcleo sólido, a diferença entre os índices de refração no núcleo (η_1) e da casca esburacada (η_2), sendo que ($\eta_1 > \eta_2$), são responsáveis pelo aprisionamento da luz no núcleo, sendo esta a condição essencial para que a fibra funcione como guia de luz.

As PCFs de núcleo sólido possuem propriedades superiores às fibras ópticas convencionais. Dentre elas, podemos destacar as características especiais do revestimento fotônico dos cristais que são devidas ao grande contraste entre os índices de refração do núcleo e da casca.

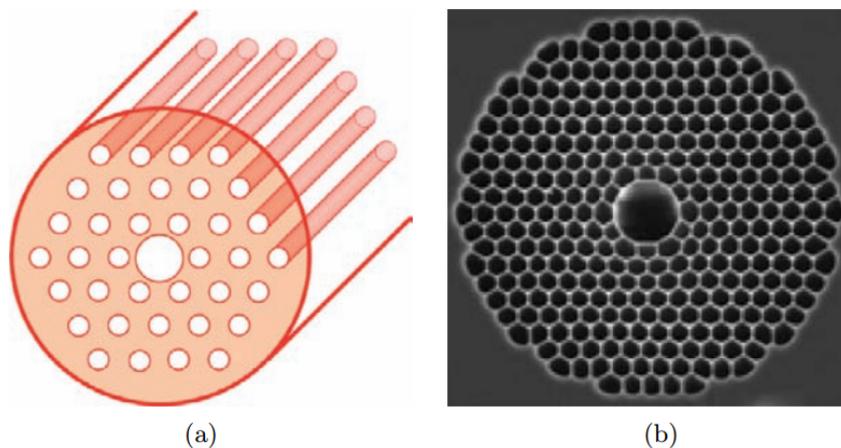
Estas características associadas à natureza bidimensional da micro-estrutura permitem obter: o controle da birrefringência, da dispersão, menor tamanho de núcleo, o número de modos guiados e a abertura numérica (POLI *et al.*, 2007).

2.2.3 Fibra de Cristal Fotônico de Núcleo Oco

As PCFs de núcleo oco, representadas na Figura 6, também são constituídas por cristal fotônico bidimensional, de sílica pura, revestida por buracos de ar que se estendem por toda a extensão da fibra. A diferença está no design da fibra óptica, que é completamente diferente da fibra tradicional, pois o revestimento de cristal fotônico (casca) apresenta lacunas nos intervalos do índice modal suportado (β/κ_0) onde não há modos de propagação (POLI *et al.*, 2007).

Essas fibras não podem ser fabricadas com óptica convencional, e têm relação com às fibras de Bragg, pois neste caso, a luz não é guiada por reflexão interna total.

Figura 6 – (a) Representação de uma PCF de núcleo oco. (b) Imagem microscópica de uma PCF de núcleo oco.



Fonte: Poli *et al.* (2007).

Estas estruturas geométricas periódicas apresentam uma banda fotônica proibida, na qual inserimos um defeito em sua estrutura para interromper a periodicidade do cristal fotônico. Esta irregularidade ou defeito, é capaz de criar regiões de propagação dentro da banda proibida do cristal fotônico, onde a luz permanece confinada e se propagando dentro deste núcleo mesmo em curvaturas feitas pela fibra. Desta forma, a propagação da luz nas PCFs de núcleo oco, ocorre de maneira diferente das PCFs de núcleo sólido, pois acontece através de um efeito chamado PGB (*Photonic Bandgap*) (BIRKS *et al.*, 1997; KNIGHT *et al.*, 1998; BROENG *et al.*, 1999).

Assim, aproveitando-se deste *bandgap fotônico* a luz é guiada através de um núcleo oco gerado no próprio cristal fotônico. Este efeito cria regiões onde a propagação dos fótons de luz é proibida e a densidade dos estados eletromagnéticos é nula. Entretanto, estas estruturas de bandas fotônicas também dependem da geometria da fibra e da diferença entre os índices de refração de núcleo e da casca. Neste caso, o índice de refração do núcleo (η_1) é menor que o da casca (η_2), isto é, ($\eta_1 < \eta_2$), e não há reflexão interna total, a luz é guiada por *difração de Bragg* (Difração). (BIRKS *et al.*, 1997; KNIGHT *et al.*, 1998; SILVA *et al.*, 2002).

Portanto, é notável que nestas estruturas fotônicas há um grande potencial óptico, pois suas características únicas de guia de luz minimizam os efeitos de dispersão cromática, absorção óptica e não-linearidade devido à orientação do ar no núcleo oco e à pequena sobreposição resultante entre a sílica e o modo de propagação (OUZOUNOV *et al.*, 2003; SAITOH; KOSHIBA, 2005; BROENG *et al.*, 1999). Tais características fazem destas fibras excelentes candidatas para serem usadas em modernos sistemas de telecomunicações e transmissão de informações.

Assim, fazendo uma comparação entre as PCFs de núcleos sólido e oco, percebe-se que a principal diferença entre elas é que nas PFCs de núcleo sólido, a luz é guiada pelo efeito da reflexão interna total, sendo que o índice de refração do núcleo (η_1) é maior que o índice de refração da casca (η_2), isto é ($\eta_1 > \eta_2$). Já nas PCFs de núcleo oco, a luz é guiada através de um efeito chamado de PGB e o índice de refração do núcleo (η_1) é menor que o índice da refração da casca (η_2), isto é ($\eta_1 < \eta_2$).

2.2.4 Propriedades e aplicações das PCFs

A flexibilidade no arranjo da estrutura (buracos de ar) das PCFs permite o controle do contraste entre o índice de refração do núcleo e do revestimento de cristal fotônico (casca esburacada), gerando novas e únicas propriedades ópticas. Tais propriedades superam as características de guiamento das fibras ópticas convencionais, com potencial para serem aplicadas em diversas áreas da ciência e tecnologia (POLI *et al.*, 2007).

Desta forma, percebe-se que o mecanismo de guia utilizado pelas PCFs é diferente das fibras ópticas convencionais.

Entretanto, para funcionar como mecanismo de guia, devem ser estabelecidas algumas condições para que os pulsos de luz se propaguem apenas no(s) núcleo(s) da fibra, e não se propaguem pela casca. Considerando a componente de constante de propagação β ao longo da extensão da fibra, o maior valor que pode existir em um meio homogêneo infinito com

índice de refração η é $\beta = \eta \kappa_0$, em que κ_0 é a constante de propagação no espaço. Portanto, todos os valores menores de β são permitidos e, em um determinado comprimento de onda, isso corresponde ao modo fundamental de uma placa infinita do material, e esse valor β define o seu índice de refração efetivo (POLI *et al.*, 2007).

As PCFs possuem características que despertam a atenção da comunidade científica. Certamente as mais importantes são a capacidade de confinamento de modos e suas propriedades de dispersão. Estas características podem ser adaptadas variando-se os seguintes parâmetros geométricos da fibra: diâmetro, distância, quantidade, disposição dos orifícios de ar ou a distâncias entre os núcleos (SAITOH *et al.*, 2003; POLI *et al.*, 2004).

É importante destacar que a diferença entre os índices de refração do núcleo e da matriz de buracos que constitui o revestimento da fibra permite maior confinamento de luz, portanto melhores interações não-lineares (FERREIRA *et al.*, 2009). Logo, a otimização destas propriedades das fibras significa que podem ser desenvolvidos dispositivos mais eficientes e de baixo custo em relação aos tradicionais dispositivos eletrônicos.

Portanto as PCFs são fortes candidatas para atender às altas exigências de circuitos eletrônicos e transmissão de informações do início do século XXI, satisfazendo a diversas aplicações específicas, e melhorias das propriedades ópticas (BIRKS *et al.*, 1997; BRODERICK *et al.*, 1999; FINAZZI *et al.*, 2003)

2.2.5 Efeitos Não-lineares em PFCs (Não-linearidade e Dispersão)

As PCFs de núcleo sólido possuem contrastes entre seus índices de refração muito mais elevados do que às fibras ópticas convencionais. Estas diferenças de contrastes podem ser obtidas fazendo grandes furos de ar ou reduzindo a dimensão do núcleo da fibra, de modo que a luz seja forçada para dentro do núcleo de sílica. Assim, alcança-se um forte confinamento do modo guiado, melhorando os efeitos não-lineares devido à alta intensidade de campo óptico no núcleo. Além disso, há muitos experimentos não-lineares que exigem propriedades específicas de dispersão das fibras. Desta forma, as PCFs podem ser usadas com sucesso para desenvolver dispositivos de fibra não-lineares, com uma dispersão adequada, e esta é atualmente uma de suas aplicações mais importantes (POLI *et al.*, 2007; AGRAWAL, 2012).

Considerando que o material que constitui as PCFs (sílica - SiO_2) é amorfo e homogêneo, os pulsos que se propagam numa fibra óptica sofrem a ação dos efeitos da dispersão e dos efeitos não-lineares. Portanto, estes efeitos surgem da interação entre a luz e o dielé-

trico da fibra óptica na presença de campos eletromagnéticos intensos (KNIGHT *et al.*, 2000). Conseqüentemente, nas PCFs, a não-linearidade efetiva γ da fibra é dada por:

$$\gamma = \frac{2\pi\eta_2}{\lambda A_{eff}}, \quad (2.1)$$

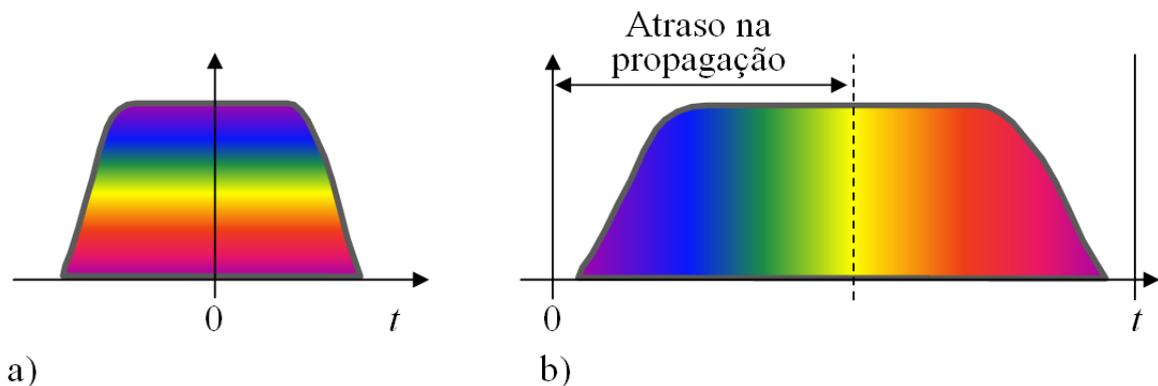
em que A_{eff} representa a área do modo efetivo, λ é o comprimento de onda da luz e η_2 é o coeficiente de índice não-linear. Esta Equação mostra que a não-linearidade γ da fibra pode ser otimizada reduzindo a área de modo efetivo A_{eff} , definida na Equação 2.2 por:

$$A_{eff} = \frac{\eta_2 [\int \int E(x,y) \cdot E^*(x,y) dx dy]^2}{\int \int \bar{\eta}_2(x,y) [E(x,y) \cdot E^*(x,y)]^2 dx dy}, \quad (2.2)$$

na qual $E(x,y)$ é o campo elétrico transversal e $\bar{\eta}_2(x,y)$ é o coeficiente de índice não-linear do material na posição (x,y) . Também se observa que a área do modo efetivo depende da diferença entre os índices de refração do núcleo e da casca esburacada, e da dimensão do núcleo (SANG *et al.*, 2005). Desta forma, define-se que os melhores projetos de PCFs possuem grandes quantidades de buracos de ar e espaçamentos entre estes orifícios maiores que $1 \mu m$, pois assim, há alta não-linearidade e baixa perda de confinamento (FINAZZI *et al.*, 2003).

No núcleo da fibra, os comprimentos de onda de luz viajam a velocidades diferentes e originam um fenômeno chamado dispersão cromática, que aumenta à medida que os pulsos se distanciam. A dispersão, representada na Figura 7, é um efeito linear que limita o desempenho das fibras ópticas causando o alargamento dos pulsos, interferência entre os sinais e perdas de informações à medida que os pulsos se propagam na fibra (AGRAWAL, 2007; POLI *et al.*, 2007).

Figura 7 – Representação da dispersão da luz no núcleo de uma PCF. Na Figura 7a a dispersão é nula e em 7b a dispersão é positiva.



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Desta forma, o material que constitui as PCFs causa a dispersão dos pulsos de luz. Conseqüentemente, os pulsos de luz com frequências diferentes percorrem o núcleo da fibra com velocidades

diferentes. Portanto, em projetos otimizados de telecomunicações, há a necessidade de se controlar este efeito, pois os pulsos de luz transportam as informações e, ocorrendo dispersão nestes pulsos, haverá também dificuldades na identificação dos sinais. Entretanto, nas PCFs, temos um diferencial, esta dispersão pode ser controlada e adaptada com liberdade (AGRAWAL, 2001; AGRAWAL, 2007; POLI *et al.*, 2007).

Este controle sobre a dispersão oferecido pelas PCFs é de grande interesse, pois esta característica não é possível nas fibras convencionais. É obtido através da alta diferença entre os índices de refração da sílica e do ar, e da flexibilidade de alterar os tamanhos e os padrões destes orifícios de ar. Desta forma, permite-se obter uma gama muito mais ampla de comportamentos de dispersão nas PCFs do que em fibras convencionais. (POLI *et al.*, 2004; POLI *et al.*, 2007).

Portanto, o controle da dispersão real (D) em PCFs, definido na Equação 2.3, é importante para o estudo das fibras ópticas. Já a dispersão de velocidade do grupo (GVD) β_2 é determinada pela dispersão da sílica e pelos parâmetros de diâmetro, espaçamento e padrão dos furos de ar, permitindo maior flexibilidade e adaptação à aplicação desejada (FERRANDO *et al.*, 2000; SANG *et al.*, 2005).

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

Nesta Equação, temos que β_2 representa a dispersão de velocidade de grupo (GVD), η_{eff} é o índice de refração efetivo do modo, definido por $\eta_{eff}(x, y) = \beta[\lambda, \eta_m(\lambda)]/\kappa_0$, β é a constante de propagação, κ_0 é o número de onda de espaço livre, definido por $\kappa_0 = 2\pi/\lambda$ e η_m é a dispersão cromática do material. Observa-se ainda que a dispersão da fibra é determinada pela relação de dependência entre β e λ .

A primeira relação surge da dependência explícita da constante de propagação do modo em λ , determinada de acordo com a geometria da distribuição do índice de refração $\eta_g(\lambda)$ na PCF, chamada de dependência geométrica, definida por $D_g = -(\lambda/c)d^2\eta_g(\lambda)/d\lambda^2$. A segunda relação surge da dependência implícita entre β e λ através da dispersão cromática do material D_m , e é definida por $D_m = -(\lambda/c)d^2\eta_m(\lambda)/d\lambda^2$. Assim, a dispersão total D (Equação 2.4), é dada pela soma da dispersão geométrica D_g mais a dispersão do material D_m na aproximação de primeira ordem (FERRANDO *et al.*, 2000; SANG *et al.*, 2005).

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

Da Equação 2.3, fica evidente que a dispersão de velocidade de grupo pode ser projetada, e que as propriedades de dispersão das PCFs podem ser adaptadas alterando os diâmetros de

buracos de ar d , e o espaçamento do revestimento Λ . Da Equação 2.4, percebe-se que é muito importante projetar a dispersão geométrica D_g e que o índice de refração efetivo $\eta_g(\lambda)$ depende dos parâmetros de revestimento (casca) da fibra, diâmetro dos furos de ar d e distância entre os furos de ar Λ , e do comprimento de onda (λ) (FERRANDO *et al.*, 2000; KERRINCKX *et al.*, 2004; SANG *et al.*, 2005).

2.3 Equações de Maxwell

Os trabalhos de James Clerk Maxwell, em 1865, produziram a teoria base para o estudo dos fenômenos ópticos, respeitando os limites da óptica clássica. Desta forma, Maxwell realizou uma das sínteses fundamentais para a história da Física e das Telecomunicações. Mostrou que todos os fenômenos elétricos, magnéticos e ópticos podem ser representados por quatro equações diferenciais, em notação vetorial, conhecidas hoje como as *equações de Maxwell* (CARUSO; OGURI, 2006).

A tecnologia usada nas PCFs faz o uso da luz para transportar as informações, e como todos os fenômenos eletromagnéticos, a propagação nestes meios ópticos é explicado pelas *equações de Maxwell*, representadas nas Equações 2.5 a 2.8.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{lei de Faraday}) \quad (2.5)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{lei de Ampère-Maxwell}) \quad (2.6)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{lei de Gauss elétrica}) \quad (2.7)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{lei de Gauss magnética}) \quad (2.8)$$

Estas equações mostram que uma grande variedade de fenômenos podem ser descritos por um pequeno número de equações. Assim, temos que \vec{E} e \vec{H} representam os vetores de campos elétrico e magnético, respectivamente, e \vec{D} e \vec{B} são as densidades de fluxo elétrico e magnético, ρ é a densidade de carga, \vec{J} é o vetor densidade de corrente, t é o tempo e $\vec{\nabla}$ (nabla) é o operador diferencial. Na ausência de cargas livres, em um meio como fibras ópticas, temos que $\vec{J} = 0$ e $\rho = 0$ (CARUSO; OGURI, 2006; AGRAWAL, 2007).

Considerando que as fibras ópticas são constituídas de materiais que não sofrem interferências magnéticas, é possível estabelecer uma relação entre os parâmetros \vec{D} , \vec{B} , \vec{E} e \vec{H} , da

seguinte forma:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}, \quad (2.9)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M}, \quad (2.10)$$

em que, ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo, μ_0 é permeabilidade magnética, \vec{P} e \vec{M} são as polarizações elétricas e magnéticas induzidas no meio. Entretanto, em fibras ópticas, $\vec{M} = 0$, pois são meios não magnéticos.

Desta forma, estabelecendo uma relação entre as equações de Maxwell, obtém-se a equação de onda que descreve a propagação da luz em fibras ópticas. Para isto, faz-se uso as Equações (2.5) e (2.6), substituindo as expressões \vec{D} e \vec{B} das Equações (2.9) e (2.10). Desta forma, obtém-se a Equação 2.11, que descreve a propagação de uma onda eletromagnética numa fibra óptica (AGRAWAL, 2007)

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2}, \quad (2.11)$$

em que \vec{E} representa o vetor campo elétrico, c é a velocidade de propagação da luz no vácuo, μ_0 é a permeabilidade do vácuo. Substituindo os valores de $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \rightarrow \frac{1}{c^2} = \mu_0 \epsilon_0$, na equação 2.11, ela pode ser reescrita como:

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2}. \quad (2.12)$$

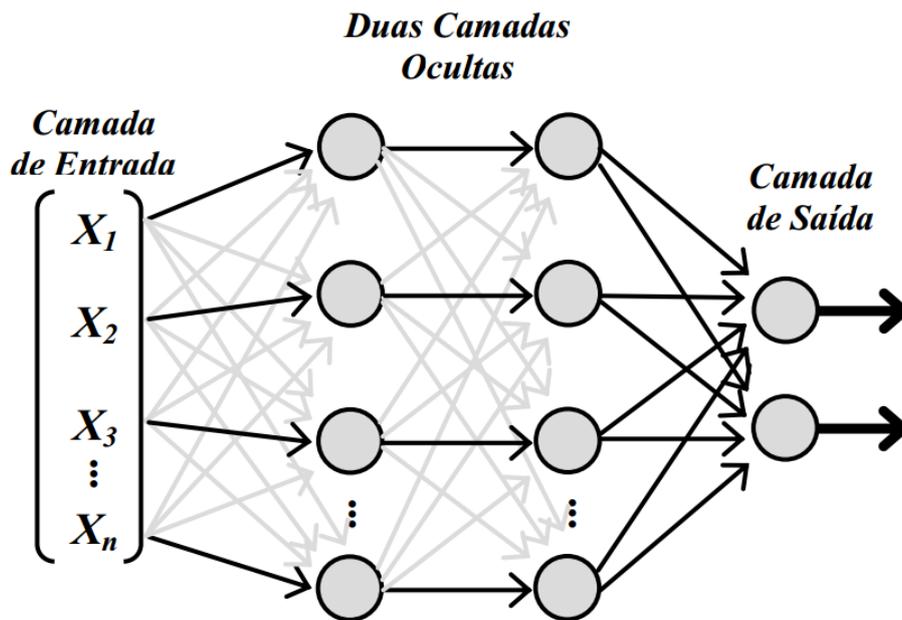
É importante destacar que, quando estas equações foram obtidas, havia pouco conhecimento sobre a natureza da luz. Foi somente com estes trabalhos de Maxwell, que se descobriu que, no vácuo, a onda eletromagnética possuía a mesma velocidade de propagação da luz, ou seja, 3×10^8 m/s. Portanto, a partir desta observação, pode-se fazer a relação entre a óptica e o eletromagnetismo (AGRAWAL, 2012).

2.4 Rede Neural Perceptron de múltiplas camadas (MLP – multilayer perceptron)

Redes neurais são técnicas de programação de computação que se assemelham ao funcionamento dos neurônios do cérebro humano. Para isso, usam algoritmos para reconhecer padrões e correlações em um conjunto de dados com o objetivo aprender e melhorar o seu funcionamento. São compostas por camadas de neurônios ligadas através de sinapses, cada um com pesos específicos. O aprendizado destas redes é geralmente feito através do algoritmo de retro-propagação do erro.

Portanto, entre as diversas arquiteturas de redes, as MLPs (Multilayer perceptrons) destacam-se por serem redes neurais em que vários neurônios estão conectados e organizados em camadas. Essas redes possuem diversas aplicações e podem ser utilizadas para solucionar diversos tipos de problemas relacionados com as mais diferentes áreas do conhecimento (SILVA *et al.*, 2010). A Figura 8 mostra a estrutura típica de uma MLP.

Figura 8 – Arquitetura de uma rede perceptron de multicamadas com duas camadas ocultas



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Esta estrutura é constituída basicamente de três partes: camada de entrada, camadas ocultas e camada de saída. Na camada de entrada, cada nó recebe um sinal de entrada, repassando-o para as camadas ocultas. Consequentemente, os sinais de entradas são transmitidos a cada um dos nós da camada oculta e a saída de cada nó desta camada é transmitida aos nós da camada de saída.

A forma de aprendizado das redes neurais multicamadas se assemelha às perceptrons simples com uma diferença básica: nas MLPs os neurônios possuem pesos associados às entradas e há muito mais pesos a serem ajustados quando um erro é cometido para um fragmento de dados de treinamento. Sobre o ajuste dos pesos, utiliza-se a retropropagação, isto é, calcula-se o erro cometido pela rede e, em seguida, atualiza-se o valor de todos os pesos das camadas a partir da última voltando para a primeira camada. Este procedimento é importante e tem como objetivo diminuir ao máximo o erro da rede (SILVA *et al.*, 2010; COPPIN, 2015; HAYKIN, 2007).

O algoritmo de retropropagação também funciona da mesma maneira de uma perceptron simples, primeiro atribui-se aos pesos da rede valores aleatórios e menores que 1, geralmente valores entre $-0,5$ e $0,5$. Outra alternativa bastante utilizada é distribuir os pesos entre $-2,4/n$ e $2,4/n$, em que n é o número de entradas da camada de entrada (COPPIN, 2015).

Uma das funções de ativação das MLPs com retropropagação é a sigmoide, expressa na Equação 2.13. Sua importância se dá pelo fato de incluir um componente não linear nas redes neurais, que é o fator responsável pelo aumento da taxa de aprendizado da rede.

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2.13)$$

Esta função é utilizada em RNAs, por ser biologicamente mais aceitável (COPPIN, 2015). Os neurônios atuam de forma de binária, isto é, 0 (zero) ou 1 (um). Ao 0 atribui-se a não ativação e ao 1 a ativação. Assim, cada iteração do algoritmo envolve, de início, a alimentação de dados por meio da rede, desde as entradas até as saídas. A próxima fase envolve a alimentação de erros de volta, das saídas às entradas. Conseqüentemente, os valores de erros são alimentados de volta, através da rede, e esta faz mudanças nos pesos dos nós ao longo de todo o caminho. Desta forma, estes passos serão efetuados até que se encontre os menores valores de erros possíveis (SILVA *et al.*, 2010; COPPIN, 2015; HAYKIN, 2007).

A próxima seção faz um estudo sobre os dois tipos de acopladores de PFCs simulados e estudados: acoplador duplo e simétrico (2 núcleos) e acoplador triplo simétrico de arranjo planar (3 núcleos). O capítulo contém as equações que descrevem suas potências críticas, a transmissão de potência e o comprimento de acoplamento dos acopladores de PFCs.

3 ACOPLADORES DE FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO

A crescente demanda por meios de comunicação mais rápidos e eficientes gera a necessidade de maior velocidade em sistemas de telecomunicações e uma das formas de aumentar a velocidade do tráfego de dados é tornar o processamento da informação totalmente óptico. Neste contexto, os dispositivos de acoplamento de PCFs, chamados de acopladores, são uma boa alternativa. Suas propriedades e características são de grande importância para o desenvolvimento dos sistemas de telecomunicações e processamento de sinais, principalmente para o chaveamento de pulsos ópticos ultracurtos (BIOLATTI *et al.*, 2000; PERNICE *et al.*, 2012).

Há vários estudos que demonstram que os Acopladores de Fibra de Cristal Fotônico são dispositivos ópticos essenciais aos sistemas de telecomunicações, sobretudo para a obtenção de portas lógicas totalmente ópticas. Seu diferencial em relação às fibras ópticas convencionais é que suas estruturas e arranjos otimizam significativamente o comprimento de acoplamento. Desta forma, é possível reduzir as estruturas físicas da fibra, economizando espaço e reduzindo os custos de fabricação (ALMEIDA *et al.*, 2007; FERRANDO *et al.*, 2000; MENEZES *et al.*, 2007).

O estudo e o desenvolvimento das PCFs representam avanços significativos aos sistemas de telecomunicações. Portanto, é importante promover pesquisas sobre projetos de acopladores, interferômetros ou guias de onda visando a obtenção de dispositivos mais eficientes e portas lógicas totalmente ópticas com alta performance. Neste trabalho, demonstra-se uma evolução para as PCFs, pois os resultados mostram que é possível obter portas lógicas AND e OR de duas e três entradas, de alto desempenho com excelentes taxas de contrastes. Estes dispositivos são importantes para o desenvolvimento de circuitos ópticos, pois suas características proporcionam economia e melhor aproveitamento dos espaços físicos ao diminuir o tamanho dos dispositivos. Além do mais, diminuem as perdas de energia e tempo de processamento usando expressões prontas ao invés de um conjunto de outras portas lógicas concatenadas (COELHO *et al.*, 2012; ARAÚJO *et al.*, 2015; LEE *et al.*, 2002; ZENG *et al.*, 2010).

A maioria dos dispositivos de acoplamentos ópticos convencionais tem comprimento de acoplamento que pode variar de algumas unidades a dezenas de metros. Isso significa que são muito grandes e ocupam muito espaço, dificultando a sua utilização em circuitos ópticos mais complexos, (ALMEIDA *et al.*, 2007; FERREIRA *et al.*, 2009; MENEZES *et al.*, 2007). Assim, uma forma eficiente de otimização destes dispositivos tradicionais é a utilização de PCFs, pois

estas fibras oferecem uma redução significativa nos comprimentos de acoplamentos, obtendo os mesmos resultados e efeitos, além de minimizar o comprimento da fibra (LIU; CHIANG, 2010; ARAÚJO *et al.*, 2015; KHAN *et al.*, 2008).

Nos sistemas de telecomunicações modernos os acopladores de PCFs são usados como dispositivos ópticos passivos. São formados por guias de ondas contendo dois ou mais núcleos, em que há a transfência de potência entre estes núcleos. Esta troca de energia é feita unindo-se os núcleos, de forma que ao serem aproximados, há a sobreposição de seus modos fundamentais de propagação, ocorrendo a transferência de energia entre eles. Entretanto, para ocorrer estas trocas de energias, a relação entre os parâmetros geométricos diâmetro dos buracos de ar (d) e distância entre os buracos de ar (Λ) deve ser maior ou igual a 2 e, menor ou igual a 4, isto é, ($2 \leq d/\Lambda \leq 4$). Portanto, temos que d deve ser de duas a quatro vezes maior que Λ (CHIANG, 1995; DROULIAS *et al.*, 2004).

Quanto às características de simetria, os acopladores serão simétricos se seus núcleos tiverem os mesmos tamanhos, distâncias e índices de refração. Entretanto, se os núcleos forem diferentes em algum aspecto, o acoplador será assimétrico. Quanto aos índices de refração, por serem positivos, preservam o sentido de propagação das ondas luz, e as características geométricas d e λ determinam as dispersões e não-linearidades a serem utilizadas nas equações dos modos acoplados.

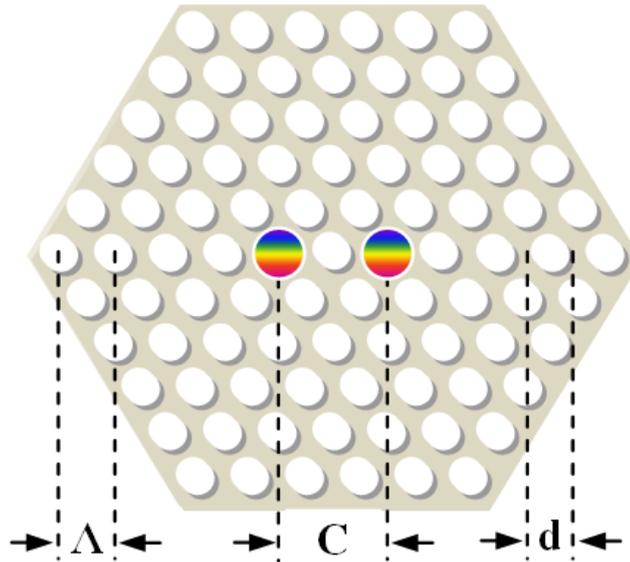
3.1 Acopladores duplos de PCFs

Os Acopladores duplos de PCF consistem de uma estrutura cilíndrica de sílica, rodeada por dezenas de buracos de ar e dois núcleos. Dependendo do projeto ou da forma como se pretende guiar a luz, estes núcleos podem ser sólidos ou ocos, paralelos e simétricos. Como mostra a Figura 9, tais estruturas são representadas por uma distância C que separa os núcleos, distância entre os núcleos dos buracos de ar Λ , diâmetro dos buracos de ar d e, também podem ser utilizadas como um acoplador de cristal fotônico (AGRAWAL, 2012; RAMASWAMI *et al.*, 2009).

Estes dispositivos de acoplamento possuem quatro portas: duas portas de entradas (Porta 1 e porta 2) e duas portas de saídas (porta 3 e porta 4) que tem a função de dividir coerentemente o feixe óptico incidente em uma das portas de entrada e direcioná-lo para as portas de saídas, conforme ilustra a Figura 10.

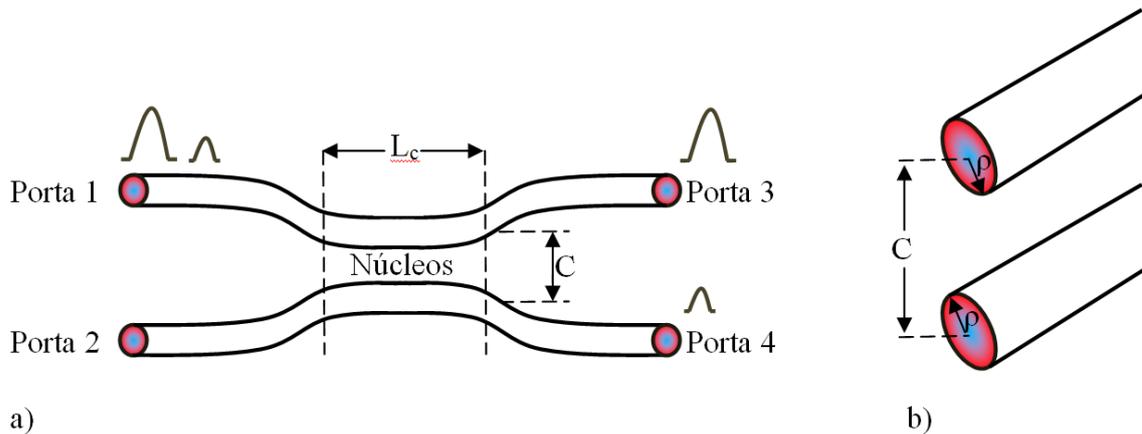
Nas fibras de acoplamento duplo a Potência Crítica P_C , Equação 3.1, é o valor

Figura 9 – Seção transversal de uma PCF de dois núcleos sólidos e simétricos. As áreas brancas são furos com ar e as áreas cinzas são constituídas de sílica.



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Figura 10 – Representação de um acoplador duplo e simétrico de 4 portas, comprimento de acoplamento L_C , distância entre os núcleos C e raio dos núcleos ρ .



Fonte: COSTA (2013). Adaptado pelo autor (2019).

que determina o direcionamento e divisão dos feixes de luz. Por exemplo, tomando como base a Figura 10, se for inserida no núcleo 1 (Porta 1) uma potência óptica menor do que um determinado valor de P_C , o dispositivo se comporta como um acoplador linear. Desta forma, um feixe óptico inserido à primeira porta de entrada (Porta 1) será completamente deslocado para a porta 4. De outra forma, quando a potência óptica for maior do que P_C , um feixe óptico aplicado à porta de entrada (Porta 1) não será deslocado, será direcionado à porta 3. Por fim, quando a potência óptica for igual a P_C , um feixe óptico aplicado à porta de entrada (Porta 1) será dividido

para as duas saídas em proporções iguais, 50% de potência para a Porta 3 e 50% de potência para a Porta 4. A Potência Crítica P_C , pode ser definida por:

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

na qual, λ é o comprimento da onda de luz, A_{eff} é a área de modo não-linear efetiva, η_{NL} é o índice de refração não-linear e L_C é o comprimento de acoplamento necessário para que haja transferência de potência entre os núcleos e está definido na Equação 3.2 (SHIN *et al.*, 2010):

$$L_C = \frac{\pi}{2\kappa}. \quad (3.2)$$

Nesta Equação, κ representa o coeficiente de acoplamento linear entre os guias adjacentes. Analisando a Equação 3.1 verificamos que P_C e L_C são grandezas inversamente proporcionais, isto é, se uma aumenta a outra diminui na mesma proporção (SHIGA *et al.*, 2004).

A equação matemática utilizada para explicar a propagação dos pulsos de luz nas fibras ópticas em meios de propagação livre de cargas é a equação não-linear de Schrödinger (NLSE), desenvolvida a partir das equações de Maxwell (AGRAWAL, 1989).

Em fibras de cristal fotônico, devemos também considerar os efeitos de dispersão e de não-linearidades de altas ordens, são eles: efeitos de variação de fase, deslocamento temporal, Dispersão de Terceira Ordem (TOD), Dispersão de Velocidade de Grupo (GVD), Automodulação de Fase (SPM) e Modulação de Fase Cruzada (XPM) (LIU; CHIANG, 2010). Considerando tais efeitos, aplicando a equação não-linear de modo acoplado a cada núcleo do acoplador, tem-se:

$$i \frac{\partial a_1}{\partial z} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 a_1}{\partial t^2} - i \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 a_1}{\partial t^3} + \gamma (|a_1|^2 + \eta |a_2|^2) a_1 + i \frac{\gamma}{\omega} \frac{\partial (|a_1|^2 a_1)}{\partial t} - \gamma a_1 T_r \frac{\partial |a_1|^2}{\partial t} + \kappa_0 a_2 + i \kappa_1 \frac{\partial a_2}{\partial t} = 0 \quad (3.3)$$

$$i \frac{\partial a_2}{\partial z} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 a_2}{\partial t^2} - i \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 a_2}{\partial t^3} + \gamma (|a_2|^2 + \eta |a_1|^2) a_2 + i \frac{\gamma}{\omega} \frac{\partial (|a_2|^2 a_2)}{\partial t} - \gamma a_2 T_r \frac{\partial |a_2|^2}{\partial t} + \kappa_0 a_1 + i \kappa_1 \frac{\partial a_1}{\partial t} = 0 \quad (3.4)$$

Das Equações 3.3 e 3.4 temos que, z é o comprimento ao longo da fibra, t é o tempo de propagação dos pulsos, a_1 e a_2 são as amplitudes dos pacotes de pulsos nos dois núcleos, β_2 é a dispersão da velocidade de grupo, e β_3 é a dispersão de 3ª ordem. O parâmetro η calcula a importância relativa da automodulação de fase (SPM – *SelfPhaseModulation*) com a modulação de fase

cruzada (XPM – *CrossPhaseModulation*), κ_0 é o coeficiente de acoplamento, T_R é o coeficiente de espalhamento Raman, κ_1 é o coeficiente de dispersão de acoplamento e γ é a não-linearidade efetiva relacionada com a SPM (LIU; CHIANG, 2010; SHIN *et al.*, 2010; ARAÚJO *et al.*, 2015).

Para o modelo de acoplador duplo, simétrico, de pequeno comprimento, pulsos ópticos de baixa potência e de mesma fase inicial, os efeitos não-lineares de dispersão podem ser ignorados. Assim, as Equações de modo acoplado, 3.3 e 3.4, resumem-se a (AGRAWAL, 2001):

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

$$\frac{\partial a_2}{\partial z} = i\kappa a_1. \quad (3.6)$$

Resolvendo de forma analítica este sistema de equações diferenciais pela forma de Jordan, obtém-se como solução uma matriz de transferência de potência. Assim, para um pulso na forma normalizada inserido apenas no núcleo 1, tem-se (AGRAWAL, 2001):

$$\begin{bmatrix} \cos(\kappa z) & i \sin(\kappa z) \\ i \sin(\kappa z) & \cos(\kappa z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\kappa z) \\ i \sin(\kappa z) \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

A transmissão de potência no núcleo 1 pode ser expressa por $T_1^2 = (\cos(\kappa z))^2$. Assim, se o acoplador é simétrico, núcleos idênticos, a transmissão de potência no núcleo 1 é a mesma do núcleo 2. Desta forma, o comprimento de acoplamento L_C necessário para um chaveamento completo do pulso é dado por:

$$L_C = \frac{\pi}{2\kappa} + \frac{\eta\pi}{\kappa}, \quad (\eta \in Z_+) \quad (3.8)$$

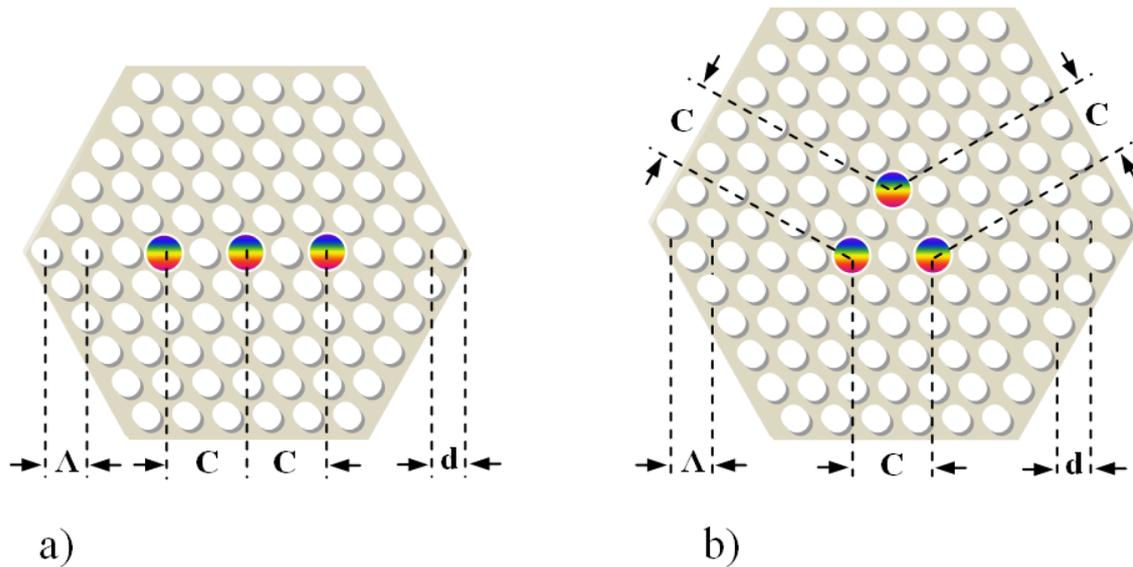
Portanto, temos que a transmissão de potência entre núcleos é periódica com o comprimento da fibra z , sendo que o menor período ocorre em $z = \pi/2\kappa$.

3.2 Acopladores Triplos de PCFs

Os Acopladores triplos de PCF, Figura 11, consistem de uma estrutura cilíndrica de sílica, rodeada por dezenas de buracos de ar e três núcleos sólidos ou ocos. A diferença para os acopladores duplos é que, com um núcleo a mais, podemos ter arranjos triangulares ou planares. Desta forma, possuem mais estados de saídas, características de comutação mais agudas e maior sensibilidade aos estados de entradas que os acopladores duplos. Portanto, também são muito importantes para o desenvolvimento de sistemas ópticos (STEGEMAN; WRIGHT, 1990; SILVA;

SOMBRA, 1998; SOTO-CRESPO; WRIGHT, 1991; AGRAWAL, 2012; RAMASWAMI *et al.*, 2009).

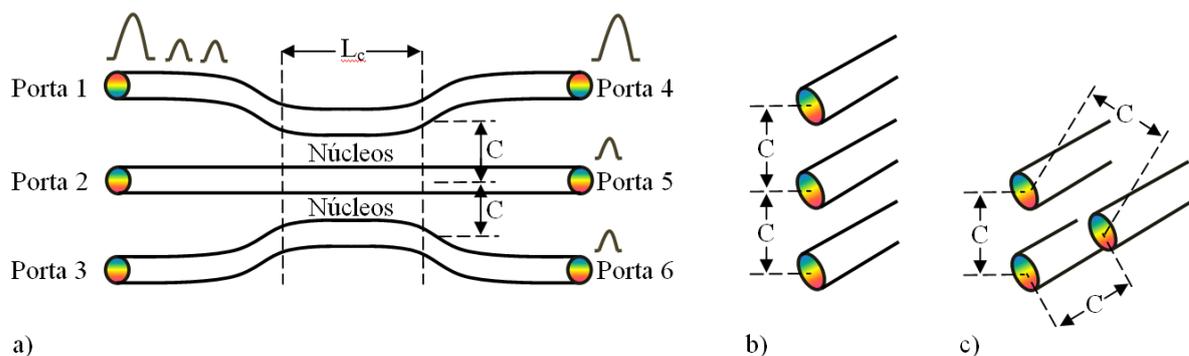
Figura 11 – Secção transversal de dois acopladores triplos de núcleos sólidos e simétricos: a) Acoplador Triplo Planar e b) Acoplador Triplo Triangular



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Estes dispositivos de acoplamento são compostos por seis portas. Há 3 entradas (Portas 1, 2 e 3) e 3 saídas (Portas 4, 5 e 6) cujas funções, também, são dividir coerentemente os feixes ópticos incidentes de uma das portas de entradas e direcioná-los para as portas de saídas, conforme ilustra a Figura 12.

Figura 12 – a) Representação de um acoplador triplo, simétrico, de 6 portas, comprimento de acoplamento L_c , distância entre os núcleos C , b) Arranjo planar, c) Arranjo triangular.



Fonte: COSTA (2013). Adaptado pelo autor (2019).

Nestas fibras, a Potência Crítica P_c , Equação 3.1, é definida pela interseção das

curvas de transmissão de energia entre os núcleos, e depende dos parâmetros: dispersão de velocidade de grupo β_2 , não-linearidade γ , SPM, coeficiente de acoplamento κ e do arranjo entre os núcleos.

Nos acopladores triplos de arranjo planar e comprimento de acoplamento L_C , Figura 12a quando um certo valor de potência óptica é inserida no núcleo 1 (Porta 1) for igual a um determinado valor de P_C , o feixe óptico aplicado à porta de entrada (Porta 1) será dividido para as três saídas na seguinte proporção: 46% de potência para a Porta 4, 46% de potência para a porta 5 e 8% de potência para a Porta 6. Para os acopladores triplos de arranjo triangular Figura 12c, se a potência óptica inserida em qualquer um dos 3 núcleos for igual a um determinado valor de P_C , o feixe óptico aplicado será dividido igualmente para as três saídas: 33,33% de potência para a Porta 4, 33,33% de potência para a porta 5 e 33,33% de potência para a Porta 6.

As equações de modo acoplado não-lineares para um acoplador triplo simétrico de arranjo planar podem ser demonstradas por três pares de equações obtidas a partir da Equação Não-Linear de Schrödinger (NLSE). Estes pares de equações descrevem a transferência de potência entre os três núcleos de um acoplador de PCF. No caso de um acoplamento de arranjo planar, Figuras 12 a) e b), não há interação entre os modos dos pulso inseridos nos núcleos 1 e 3, diferentemente do arranjo triangular, no qual os três núcleos interagem entre si. Assim, as equações de modo acoplado para o acoplador triplo planar são definidas por:

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

$$i \frac{\partial a_2}{\partial z} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 a_2}{\partial t^2} - i \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 a_2}{\partial t^3} + \gamma (|a_2|^2 + \eta |a_1 + a_3|^2) a_2 + i \frac{\gamma}{\omega} \frac{\partial (|a_2|^2 a_2)}{\partial t} - \gamma a_2 T_r \frac{\partial |a_2|^2}{\partial t} + \kappa_0 (a_1 + a_3) + i \kappa_1 \frac{\partial (a_1 + a_3)}{\partial t} = 0, \quad (3.10)$$

$$i \frac{\partial a_3}{\partial z} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 a_3}{\partial t^2} - i \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 a_3}{\partial t^3} + \gamma (|a_3|^2 + \eta |a_2|^2) a_3 + i \frac{\gamma}{\omega} \frac{\partial (|a_3|^2 a_3)}{\partial t} - \gamma a_3 T_r \frac{\partial |a_3|^2}{\partial t} + \kappa_0 a_2 + i \kappa_1 \frac{\partial a_2}{\partial t} = 0. \quad (3.11)$$

Das Equações 3.9, 3.10 e 3.11, temos que a_1 , a_2 e a_3 representam as amplitudes dos pulsos inseridos nos núcleos 1, 2 e 3, z é representa o comprimento da fibra, β_2 é a dispersão de velocidade de grupo (GVD), β_3 é a dispersão de terceira ordem (TOD), t é o tempo de duração

dos pulsos, γ é o parâmetro de não-linearidade referente à auto modulação de fase (SPM), dado por $\gamma = 2\pi n_2/\lambda A_{eff}$ (n_2 é o índice de refração não-linear, λ é o comprimento de onda da luz e A_{eff} é a área efetiva do núcleo), η é uma taxa referente a modulação de fase cruzada (XPM) em relação à SPM, T_R é o coeficiente de espalhamento Raman, κ_0 e κ_1 são o coeficiente de acoplamento e o coeficiente de acoplamento dispersivo, respectivamente. Sua relação é dada por $\kappa_1 = d\kappa_0/d\omega$ (AGRAWAL, 2007).

Entretanto, considerando-se pulsos de baixas potências, as equações de modo acoplado para acopladores simétricos e de pequeno comprimento de acoplamento L_C , podem ser expressas por:

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

$$\frac{\partial a_2}{\partial z} = i\kappa a_1 + i\kappa a_3, \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial a_3}{\partial z} = i\kappa a_2. \quad (3.14)$$

Inserindo-se pulsos na forma normalizada apenas no primeiro ou terceiro núcleo e solucionando estas equações de forma analítica, os pares de Equações diferenciais 3.12, 3.13 e 3.14 poderão ser reescritas como:

$$\begin{bmatrix} \frac{\cos(\sqrt{2}\kappa z)+1}{2} & \frac{i\sqrt{2}\sin(\sqrt{2}\kappa z)}{2} & \frac{\cos(\sqrt{2}\kappa z)-1}{2} \\ \frac{i\sqrt{2}\sin(\sqrt{2}\kappa z)}{2} & \cos(\sqrt{2}\kappa z) & \frac{i\sqrt{2}\sin(\sqrt{2}\kappa z)}{2} \\ \frac{\cos(\sqrt{2}\kappa z)-1}{2} & \frac{i\sqrt{2}\sin(\sqrt{2}\kappa z)}{2} & \frac{\cos(\sqrt{2}\kappa z)+1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos(\sqrt{2}\kappa z)+1}{2} \\ \frac{i\sqrt{2}\sin(\sqrt{2}\kappa z)}{2} \\ \frac{\cos(\sqrt{2}\kappa z)-1}{2} \end{bmatrix}. \quad (3.15)$$

Se os pulsos normalizados forem inseridos apenas no segundo núcleo obtém-se:

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

Desta forma, pode-se definir as equações de transmissão de acoplamento (T_1 e T_2), expressas respectivamente pelos pares de Equações 3.17 e 3.18, para pulsos inseridos nos núcleos 1 ou 3, e 2. Entretanto, dada a relação de simetria, no acoplamento planar, os efeitos dos pulsos inseridos nos núcleos 1 ou 3 são os mesmos:

$$T_1^2 = \frac{1}{4}(\cos(\sqrt{2}\kappa z) + 1)^2, \quad (3.17)$$

$$T_2^2 = (\cos(\sqrt{2}\kappa z))^2. \quad (3.18)$$

Sabendo que a mínima transmissão de acoplamento em T_1 , ocorre quando $T_1^2 = 0$ e que, neste caso, $z = L_C$. Igualando a Equação 3.17 a zero, tem-se que o comprimento de acoplamento L_C nos núcleos 1 ou 3, devido à simetria, pode ser representado por:

$$\frac{1}{4}(\cos(\sqrt{2}\kappa L_C) + 1)^2 = 0 \rightarrow \cos(\sqrt{2}\kappa L_C) = -1 \rightarrow \sqrt{2}\kappa L_C = \pi + 2\pi n.$$

Portanto, para pulsos inseridos apenas nos núcleos 1 ou 3, o comprimento de acoplamento L_C pode ser expresso por:

$$L_C = \frac{\pi}{\sqrt{2}\kappa} + \frac{2\pi n}{\sqrt{2}\kappa} \quad (\text{em que } n \text{ assume todos os valores positivos, } n \geq 0). \quad (3.19)$$

Logo, pode-se concluir que, no acoplador triplo planar, devido a simetria e arranjo entre os núcleos 1 e 3, estes possuem os mesmos valores de transmissão de acoplamento, isto é, $T_1 = T_3$, e o mesmo comprimento de acoplamento L_C . Portanto, quando o comprimento de acoplamento for $L_C \geq \frac{\pi}{\sqrt{2}\kappa}$, os pulsos inseridos nos núcleos 1 ou 3 poderão ser transmitidos para os outros núcleos (saídas 4, 5 ou 6) com 100% de potência.

Analisando a transmissão de acoplamento de um pulso inserido apenas no núcleo 2, e considerando que, neste caso, $z = L_C$, tem-se que a mínima transmissão de acoplamento em T_2 ocorre quando $T_2^2 = 0$. Igualando a Equação 3.18 a zero, tem-se que o comprimento de acoplamento L_C no núcleo 2, e que pode ser representado por:

$$(\cos(\sqrt{2}\kappa L_C))^2 = 0 \rightarrow \cos(\sqrt{2}\kappa L_C) = 0 \rightarrow \sqrt{2}\kappa L_C = \frac{\pi}{2} + \pi n.$$

Portanto, para pulsos inseridos apenas no núcleo 2, o comprimento de acoplamento L_C pode ser expresso por:

$$L_C = \frac{\pi}{2\sqrt{2}\kappa} + \frac{\pi n}{\sqrt{2}\kappa} \quad (\text{Onde } n \text{ assume todos os valores positivos, } n \geq 0). \quad (3.20)$$

Logo, podemos concluir que, no acoplador triplo planar, quando o comprimento de acoplamento for $L_C \geq \frac{\pi}{2\sqrt{2}\kappa}$, os pulsos inseridos no núcleo 2 poderão ser transmitidos para os outros 2 núcleos (saídas 4 ou 6) com 100% de potência.

Feitas as análises de transmissão de acoplamento entre os núcleos ($T_1 = T_3$ e T_2) e comprimento de acoplamento L_C do acoplador triplo planar pode-se observar que a relação $T_1^2 = T_2^2 = T_3^2 = 0$ não pode ocorrer simultaneamente. Assim, quando o comprimento de acoplamento for $L_C = \frac{\pi}{\sqrt{2}\kappa}$, $T_1^2 = T_3^2 = 0$, obtém-se:

$$T_2^2 = (\cos(\sqrt{2}\kappa L_C))^2 = (\cos(\sqrt{2}\kappa \frac{\pi}{\sqrt{2}\kappa}))^2 = (\cos(\pi))^2. \quad \text{Portanto, } T_2 = 1.$$

Isso significa que, quando o comprimento de acoplamento for $L_C = \frac{\pi}{\sqrt{2\kappa}}$, qualquer pulso inserido nos núcleos 1 ou 3 poderá ser redirecionado para os outros núcleos (saídas do acoplador), ver Figura 12. Entretanto os pulsos inseridos no núcleo 2 sairão apenas núcleo 2 (saída 5 do acoplador), com 100% de potência, ver Figura 12.

Para o comprimento de acoplamento $L_C = \frac{\pi}{2\sqrt{2\kappa}}$, $T_2^2 = 0$, tem-se:

$$T_1^2 = T_3^2 = \frac{1}{4}(\cos(\sqrt{2\kappa}L_C) + 1)^2 = \frac{1}{4}(\cos(\sqrt{2\kappa}\frac{\pi}{2\sqrt{2\kappa}}) + 1)^2 = \frac{1}{4}. \quad \text{Portanto, } T_1 = T_2 = \frac{1}{2}.$$

Isso significa que, quando o comprimento de acoplamento for $L_C = \frac{\pi}{2\sqrt{2\kappa}}$, qualquer pulso inserido no núcleo 2 poderá ser chaveado para os outros 2 núcleos (saídas 4 ou 6, Figura 12). Entretanto os pulsos inseridos nos núcleos 1 ou 3 transmitirão no máximo 50% de potência para os demais núcleos.

3.3 Portas lógicas totalmente ópticas em acopladores de PCFs

A partir dos estudos apresentados sobre acopladores duplos e triplos de Fibra de Cristal Fotônico - PCF, serão apresentadas, separadamente, duas metodologias, resultados e a conclusão sobre a pesquisa realizada. Os dois acopladores propostos nos trabalhos de Martins *et al.* (2018), Rodrigues *et al.* (2019) e colaboradores, são não-lineares, simétricos e planares constituídos de fibras de cristal fotônico (PCF) de núcleos sólidos. Suas secções transversais são formadas por matrizes periódicas de buracos de ar, operando com pulsos de luzes ultracurtos, com duração de 100 fs (femtosegundos) (MARTINS *et al.*, 2018). Na primeira parte do trabalho, apresenta-se a obtenção de dois dispositivos ópticos que executam as operações lógicas AND e OR usando uma Fibra de Cristal Fotônico (PCF) com três núcleos, sólidos, simétricos em arranjo planar, sob modulação PAM-ASK. O primeiro dispositivo apresenta portas lógicas AND e OR de três entradas com alto desempenho e o segundo dispositivo portas lógicas AND e OR de duas entradas, que operaram com altas taxas de contrastes e que podem ser usadas com segurança no processamento de sinais ópticos.

A concatenação de portas lógicas também é uma técnica bastante usada em circuitos ópticos. Ela permite conectar a saída de uma porta lógica à entrada de outra, conseguindo uma sequência de diversas operações lógicas em cascata. Com esta técnica é possível se obter circuitos lógicos mais eficientes e confiáveis a partir de portas simples buscando sempre alcançar resultados específicos. Através da concatenação de portas lógicas, também é possível construir circuitos aritméticos, multiplexadores, decodificadores e muitos outros componentes eletrônicos

ou digitais. No entanto, essa técnica gera algumas dificuldades, como o atraso de propagação de pulsos, já que cada porta lógica concatenada introduz um pequeno atraso no sinal. Isso torna o circuito mais complexo e vulnerável a erros de projeto e falhas de lógica. Além do mais, o cascadeamento de portas requer um dispositivo físico maior e aumento do consumo de energia para operar.

3.3.1 Acoplador Triplo Planar de PCF

Nesta seção será demonstrada a obtenção de portas lógicas totalmente ópticas baseadas em um acoplador de PCF com três núcleos sólidos, simétricos, de arranjo planar operando com pulsos solitônicos de 100 *fs* modulados em Modulação por Amplitude de Pulso com deslocamento de Amplitude (PAM-ASK). Durante este estudo foram obtidos dois dispositivos de acoplamento de comprimentos $L = 1,08 \text{ cm}$ e $L = 1,2 \text{ cm}$. Para os pulsos inseridos nos núcleos 1 e 3 do acoplador, esses dispositivos apresentam pequeno comprimento de acoplamento, portanto, são menores que a maioria dos mais usados e conhecidos no estudo dos acopladores. Na análise do primeiro dispositivo, de comprimento $L = 1,08 \text{ cm}$, foram encontradas duas expressões Booleanas comuns, porém importantes para circuitos lógicos, e as portas passivas de três entradas AND e OR. Para o segundo dispositivo, de comprimento $L = 1,2 \text{ cm}$, foram encontradas portas lógicas ativas de duas entradas AND e OR. Contudo, também é importante destacar que nestes dispositivos a seleção da operação lógica AND ou OR é feita simplesmente ajustando as fases dos pulsos de entrada.

Outro fator relevante é que todas as portas lógicas analisadas possuem altas taxas de contrastes, inclusive para os piores casos. Isso significa que elas são de alto desempenho. Um caso bem peculiar são as portas lógicas AND e OR de três entradas, pois possuem alto impacto e provavelmente foram apresentadas pela primeira vez na literatura.

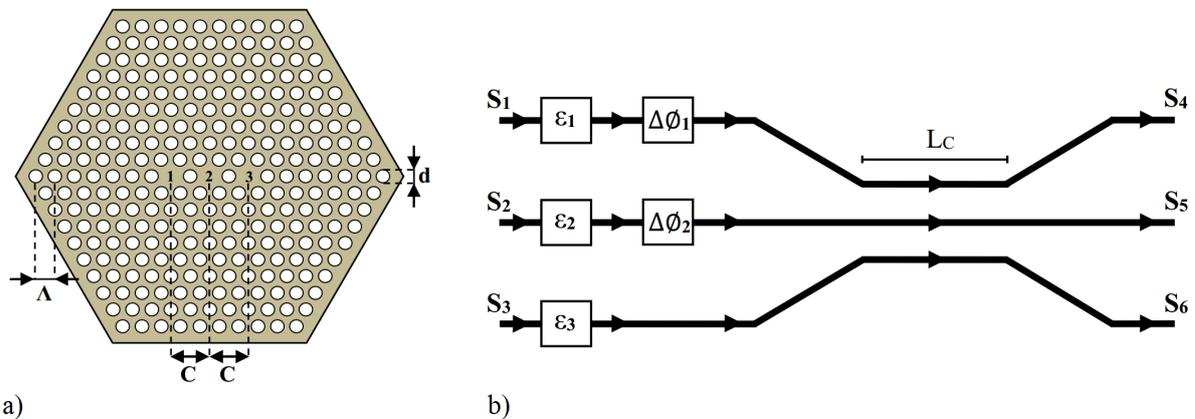
3.3.2 Estudo do Acoplador Triplo Planar

Na literatura há várias publicações de estudos teóricos e práticos que demonstram que os acopladores de PCFs de três núcleos possuem mais estados de saídas que os acopladores direcionais não-lineares de dois núcleos (NLDCs), melhores características de comutação e maior sensibilidade aos estados de entradas. Com base em vários estudos, o trabalho de Martins *et al.* (2018) estudou PCFs que podem atuar como um Acoplador Direcional Não-linear (NLDC), constituído apenas de PCF (CHIANG, 1997; LIU; CHIANG, 2010). Nestas fibras, esta

característica é de grande importância e interesse para o desenvolvimento de projetos totalmente ópticos de PCFs (STEGEMAN; WRIGHT, 1990; MENEZES *et al.*, 2007; SILVA; SOMBRA, 1998; SOTO-CRESPO; WRIGHT, 1991).

Portanto, tendo vários trabalhos como parte das referências, foi projetada uma PCF com três núcleos sólidos simétricos em arranjo planar, como a ilustrada na Figura 13a, e seu modelo de acoplador representado na Figura 13b.

Figura 13 – Representação da secção transversal da PCF de três núcleos sólidos estudada neste trabalho a), e em b) secção lateral do modelo de acoplador proposto.



a)

b)

Fonte: Martins *et al.* (2018).

Na Figura 13a, tem-se a secção transversal da PCF. Nesta, pode-se observar os três núcleos sólidos, totalmente simétricos e o arranjo planar. C é a distância entre os núcleos (1 e 2) e (2 e 3), d é o diâmetro dos furos de ar e Λ é a distância entre centros dos furos de ar. Na Figura 13b, temos a secção lateral do dispositivo de acoplamento proposto. Neste, podemos destacar seis portas, três portas de entradas (S_1 , S_2 e S_3) e três portas de saídas (S_4 , S_5 e S_6), cuja função é dividir de forma coerente o feixe óptico inserido em uma das portas de entrada e direcioná-lo para as portas de saídas. Os termos ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3 são os moduladores de amplitude dos pulsos, $\Delta\phi_1$ e $\Delta\phi_2$ são os controladores de fases, ambos entrada do acoplador, e L_C é o comprimento do acoplamento (MARTINS *et al.*, 2018).

Analisando a Figura 13b, percebe-se que, na região do comprimento de acoplamento L_C , os núcleos estão mais próximos, assim os modos fundamentais de propagação de cada núcleo se sobrepõem parcialmente na região de revestimento ao longo de todo o comprimento de acoplamento, permitindo as trocas de energias entre os núcleos.

A Figura 13b representa o modelo de acoplador proposto no estudo de Martins *et al.* (2018). Neste trabalho, os pulsos inseridos nas portas de entrada S_1 , S_2 , e S_3 são modulados em

PAM-ASK assumindo os valores de bits 0 ou 1, guiados por reflexão através de toda a fibra e do acoplador, sendo direcionados às portas de saídas S_4 , S_5 e/ou S_6 .

Os pulsos ópticos utilizados na codificação de dados em fibras ópticas possuem comprimento de onda $\lambda \approx 1,55 \mu m$ e frequência fixa que minimiza as perdas. Portanto, para tais efeitos, a modulação ASK é ideal, e por ser simples é usada na maioria de sistemas ópticos. Considerando uma secante hiperbólica do tipo $A(z, t)$ com amplitude de referência A_{REF} , como pulso de referência, parâmetro de modulação ε e considerando a amplitude do pulso de referência como sendo $A_{REF}(0, t) = A_{REF} \text{sech}(t)$. Nestas condições, a modulação do pulso assume a forma $A_b(0, t) = [A_{REF} + (-1)^{1-b} \varepsilon] \text{sech}(t)$, em que b representa os bits 0 ou 1. Desta forma, podemos dizer que para o pulso zero (bit $b = 0$), temos $A_0(0, t) = (A_{REF} - \varepsilon) \text{sech}(t)$ e para o pulso um (bit $b = 1$) temos, $A_1(0, t) = (A_{REF} + \varepsilon) \text{sech}(t)$.

A análise dos pulsos de saída foi realizada considerando a amplitude de saída A_{OUT} de cada sinal e comparando-os com uma amplitude de referência A_{REF} fixa. Desta forma, aos sinais de amplitude maior que a amplitude de referência A_{REF} foi atribuído o nível lógico 1, e para os sinais cujas amplitudes são menores que a amplitude referência A_{REF} foi atribuído o nível lógico 0. Entretanto, quando os sinais de saída tiverem o mesmo valor da amplitude de referência, isto é, quando $A_{OUT} = A_{REF}$, o nível lógico foi considerado indefinido.

3.3.3 Método Numérico

O modelo de acoplador proposto é constituído por uma PCF de três núcleos sólidos e simétricos com três moduladores de amplitudes (ε) sob modulação PAM-ASK, com dois controladores de fases ($\Delta\varnothing$). Para a solução das equações de modo acoplado foi usado o método Runge-Kutta de 4ª ordem, aplicando um passo $h = 0,00001$ e uma janela de tempo $t = 7385,254 fs$ divididos em 512 pontos. Seus parâmetros físicos são: diâmetro dos furos $d = 2 \mu m$, distância entre os furos de ar $\Lambda = d/0,9$, distância entre os núcleos (1 e 2) e (2 e 3) $C = 2\Lambda$, comprimento de onda $\lambda \approx 1,55 \mu m$ e área efetiva $A_{eff} = 41 \mu m^2$. Os valores dos parâmetros usados na PCF são: $\kappa = 87,266$, $\beta_2 = -47 ps^2/km$, $\beta_3 = 0,1 ps^3/km$, $\gamma = 3,2 \times 10^{-3} Wm^{-1}$ e $\gamma/\omega = 2,6 \times 10^{-18} s/Wm$ (KHAN *et al.*, 2008; LIU; CHIANG, 2010).

O referencial se desloca com o pulso na velocidade de grupo (v_g) e o tempo é dado por $t = t' - z/v_g$. Neste caso, usou-se a propagação soliton fundamental [$L_{ND} = L_D$] com uma largura temporal total ($TFWHM$) a metade do máximo do pulso de entrada de $\Delta t = 100 fs$. Considerando que em pequenos comprimentos de propagação as perdas são insignificantes,

desconsiderou-se os efeitos de dispersão de quarta ordem e as perdas da fibra. Para a modulação foi utilizado um parâmetro de $|\varepsilon| = 6W^{1/2}$, a potência de pico do pulso de referência é de $P_{REF} = 4,64 \text{ KW}$ e a amplitude de referência é $A_{REF} = \sqrt{P_{REF}}$.

Portanto, com base no estudo da transmissão de pulsos no acoplador triplo planar, sabe-se que para pulsos inseridos nos núcleos 1 ou 3, a transmissão de potência entre os núcleos é dada por $T^2 = \frac{1}{4}(\cos(\sqrt{2}kz) + 1)^2$. Já o menor comprimento de acoplamento ocorre quando $L_C = \frac{\pi}{2\sqrt{2}\kappa}$. Portanto, para $\kappa = 87,266$, teremos o comprimento de acoplamento $L_C \approx 1,27 \text{ cm}$ (MARTINS *et al.*, 2018).

Assim, no trabalho de Martins *et al.* (2018) foram investigados detalhadamente todos os sinais de saídas de todas as combinações de entradas possíveis com o objetivo de descobrir as melhores e menores portas lógicas. Com este propósito, foram simulados e testados diversos comprimentos menores que o comprimento de acoplamento L_C . Com esses testes, foram obtidas as portas lógicas AND e OR de duas e três entradas, nos comprimentos de $L = 1,08 \text{ cm}$ e $L = 1,2 \text{ cm}$, nos quais os melhores resultados foram destacados e estudados com base na melhor razão de contraste (CR) estabelecida entre os sinais de saídas (bits 0 ou 1) e o pulso de referência, $P_{REF} = 4,64 \text{ KW}$.

4 RECONHECIMENTO DE PORTAS LÓGICAS EM ACOPLADORES DE PCFS

O estudo proposto surge de uma observação realizada sobre saídas lógicas do acoplamento triplo planar publicado em (MARTINS *et al.*, 2018). Deste, surge a idéia de estudar a relação entre as parâmetros físicos e os pulsos lógicos de saídas de um Acoplador de PCF. Estas correlações foram estudadas e descobertas com a utilização de redes neurais MLPs. Os primeiros resultados fazem uma investigação sobre a relação existente entre as características físicas e lógicas de um acoplador duplo simétrico de PCF usando as modulações PAM e OOK. Neste problema específico, as variações de combinações de valores dos parâmetros físicos que determinam as saídas lógicas desta PCF foram analisadas por uma rede MLP, e esta foi capaz de classificar e determinar com precisão as características físicas que determinam a ocorrência da porta lógica *OR* deste estudo. Assim, a partir do conhecimento das características físicas que geram certa porta lógica, a rede neural será capaz de projetar dispositivos lógicos específicos. Portanto, neste caso a rede foi capaz de indicar com precisão a ocorrência da porta lógica *OR* para qualquer configuração de parâmetros físicos desta PCF (RODRIGUES *et al.*, 2019).

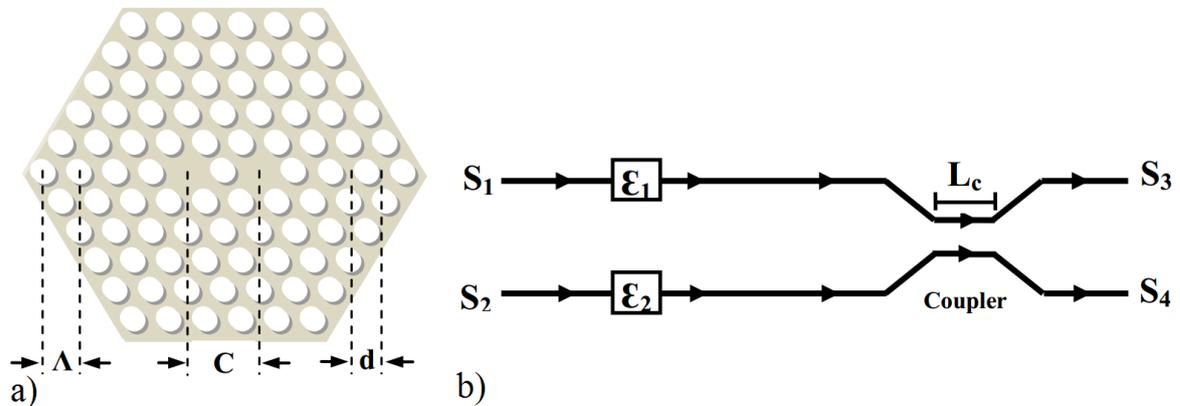
4.1 Estudo do acoplador duplo simétrico proposto

Na fundamentação deste trabalho estão descritas as teorias a respeito das propriedades e características dos acopladores. Portanto, iremos direto a parte essencial da pesquisa.

O modelo de acoplador cujos dados de saída foram utilizados para construir a base de dados deste trabalho consiste numa PCF de dois núcleos sólidos, paralelos e simétricos, separados por uma distância C , distância entre núcleos dos buracos de ar Λ e diâmetro dos buracos de ar d , ilustrada na Figura 14a, com modelo de acoplador representado na Figura 14b. O acoplador do segundo estudo, tem um núcleo a menos que o acoplador triplo descrito no trabalho de Martins *et al.* (2018). Portanto, tem-se agora um dispositivo com 4 portas, duas entradas (S_1 e S_2) e duas saídas (S_3 e S_4) cuja função, também, é dividir coerentemente os feixes ópticos incidentes em uma das portas de entradas e direcioná-los para as portas de saídas, conforme ilustra a Figura 14b. Para este estudo, na entrada do acoplador, temos apenas os moduladores de amplitude dos pulsos ϵ_1 e ϵ_2 , em seguida temos o comprimento do acoplamento L_C (RODRIGUES *et al.*, 2019).

Assim como no acoplamento triplo, na região do comprimento de acoplamento L_C , Figura 14b, os núcleos são aproximados, sobrepondo os modos fundamentais de propagação

Figura 14 – a) Representação da secção transversal da PCF de dois núcleos sólidos estudada neste trabalho e, b) secção lateral do modelo de acoplador proposto.



Fonte: Rodrigues *et al.* (2019). Adaptado pelo autor (2019).

na região de revestimento ao longo de todo o comprimento de acoplamento. Isso permite que ocorram as trocas de energias entre os núcleos (RODRIGUES *et al.*, 2019)

Para o modelo de acoplador proposto neste estudo, os pulsos de entrada são modulados utilizando o parâmetro de modulação de amplitude m . Esse parâmetro varia de 0,1 a 1, de forma que para $0,1 \leq m \leq 0,9$, temos modulação por amplitude de pulso PAM, e para $m = 1$, temos modulação on-off OOK. Os pulsos de nível lógico 1 são expressos por $1 + m$, portanto suas amplitudes podem variar entre 1 e 2. Os pulsos de nível lógico 0 são expressos por $1 - m$, portanto suas amplitudes podem variar entre 0 e 0,9. A modulação OOK é a mais simples, de menor custo e empregada em diversos sistemas digitais. A modulação PAM, por outro lado, é bastante aplicada na maioria dos sistemas digitais ópticos, já que os pulsos transmitidos em fibras ópticas devem ter comprimento de onda de $\lambda = 1,55 \mu m$, e frequência fixa para minimizar as perdas.

Na demodulação, a análise dos pulsos de saída do acoplador é realizada pela análise e comparação dos valores de amplitude dos pulsos de saída com um valor de amplitude de referência igual a 1, $A_{REF} = 1$. Atribuímos o valor lógico 1 aos sinais cujos valores de amplitudes dos pulsos sejam maiores que 1 e valor lógico 0 aos pulsos cujos valores de amplitudes sejam menores que 1.

4.2 Método Numérico

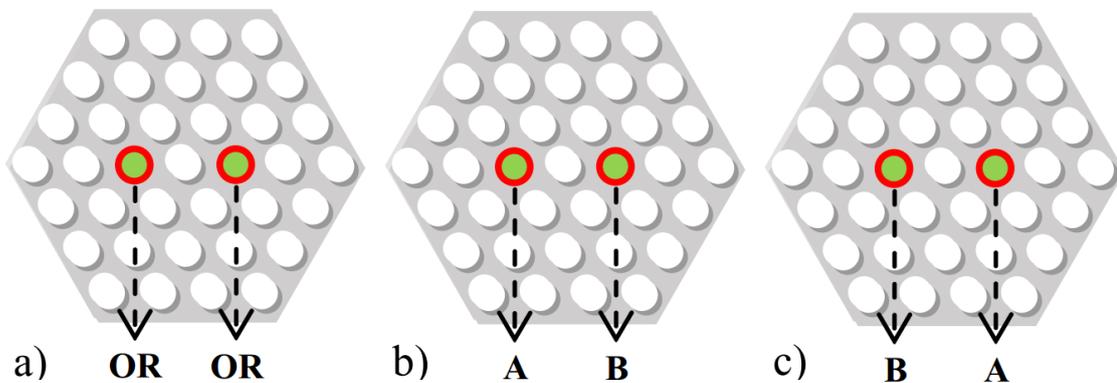
O sistema consiste em uma única PCF de dois núcleos sólidos e simétricos. Os parâmetros físicos do acoplador utilizado são: comprimento de propagação (z) variando de 0,005 m a 0,045 m , com passo 0,02; parâmetro de modulação de amplitude (m) variando de 0,1

a 1,0, com passo 0,1 e parâmetro de constante de acoplamento (κ) variando de 22 a 350, com passo 4,0. Os valores de amplitudes dos pulsos de saída do acoplador são obtidos a partir do produto da matriz de transferência de potência, Equação 4.1, com o vetor coluna correspondente ao pulso de entrada normalizado. Portanto, considerando um único pulso de nível lógico 1 inserido no núcleo 1 tem-se:

$$\begin{bmatrix} \cos(\kappa z) & i \sin(\kappa z) \\ i \sin(\kappa z) & \cos(\kappa z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+m \\ 1-m \end{bmatrix}. \quad (4.1)$$

A análise dos dados foi realizada a partir de uma base de dados contendo todas as saídas lógicas possíveis do acoplador duplo simétrico, compreendendo 17.430 amostras. De todas as amostras analisadas, observou-se a ocorrência de apenas 3 pares de saídas lógicas nos dois núcleos: a primeira saída foi ($S_3 = 0111$ e $S_4 = 0111$); a segunda ($S_3 = 0011$ e $S_4 = 0101$); e a terceira ($S_3 = 0101$ e $S_4 = 0011$). Isso significa que temos a combinação da porta lógica (OR e OR), e as portas (A e B) e (B e A) nas duas saídas S_3 e S_4 , respectivamente. A Figura 15 ilustra as três configurações possíveis para esta simulação.

Figura 15 – Secção transversal e representação das saídas nos núcleos S_3 e S_4 da PCF. a) OR-OR, b) A-B, c) B-A



Fonte: Rodrigues *et al.* (2019).

Portanto, considerando todas as variações das configurações lógicas de κ , z e m , os dados de saídas do acoplador foram divididos em três classes, contendo 3.255, 6.488 e 7.687 amostras, respectivamente, a 1ª classe representando a combinação de portas *OR – OR*, a 2ª classe representando a combinação *A – B* e a 3ª classe representando a combinação *B – A*.

A Tabela 1 representa proporcionalmente os atributos e as classes da base de dados.

Observando a Tabela 1, observa-se as possíveis variações dos três atributos da base de dados: constante de acoplamento (κ), comprimento de propagação (z) e parâmetro de modulação

Tabela 1 – Representação da base de dados: parâmetros κ , z , m e das classes.

κ	z	m	Classes
22 a 350	0,005 a 0,045	0,1 a 1,0	1 0 0
22 a 350	0,005 a 0,045	0,1 a 1,0	0 1 0
22 a 350	0,005 a 0,045	0,1 a 1,0	0 0 1

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

de amplitude (m), associados as suas respectivas classes.

Desta forma, projetou-se uma RNA capaz de analisar detalhadamente a relação entre os parâmetros: comprimento de propagação (z), constante de acoplamento (κ) e parâmetro de modulação de amplitude (m), pois é na combinação destes dados que percebe-se um padrão de correlação que determina a saída lógica nos núcleos do acoplador. A RNA aqui simulada analisa todas as saídas lógicas e com alta precisão, identifica quando há a ocorrência da combinação lógica *OR – OR*, tornando possível observar e estudar as relações e as variações ideais para sua ocorrência.

Inicialmente estudou-se um caso mais simples (acoplador duplo), investigando a relação entre os seus parâmetros físicos e lógicos. Neste estudo em particular, a RNA analisa todas as saídas lógicas e com alta precisão, identifica as ocorrências da combinação lógica *OR – OR*, tornando possível observar e estudar as relações e as variações ideais para sua ocorrência. Sobre o acoplamento triplo, resultados preliminares demonstram que com um núcleo a mais, a RNA aumenta a precisão dos resultados, fortificando o argumento de que este é um método válido e que pode ser usado para a análise de portas lógicas.

4.3 Resultados

Foi simulado um acoplador de PCF com dois núcleos sólidos em arranjo planar, simétrico, com dois moduladores de amplitudes de pulsos ε_1 e ε_2 e comprimento de acoplamento L_C . Os pulsos inseridos nas portas de entrada do acoplador (S_1, S_2), são modulados em PAM assumindo os valores de bits 0 ou 1, sendo refletidos às portas de saídas (S_4 e S_5). Os pulsos de nível lógico 1 são expressos por $1 + m$ e os pulsos de nível lógico 0 são expressos por $1 - m$.

Na demodulação, foram analisadas as amplitudes de todas as possíveis combinações de entradas da tabela verdade (variações dos bits 0 e 1). A análise dos pulsos de saída do acoplador é realizada pela análise e comparação dos valores de amplitude dos pulsos de saída

com um valor de amplitude de referência igual a 1, $A_{REF} = 1$. Atribuímos o valor lógico 1 aos sinais cujos valores de amplitudes dos pulsos sejam maiores que 1 e valor lógico 0 aos pulsos cujos valores de amplitudes sejam menores que 1.

Foram usadas várias técnicas com a finalidade de determinar e classificar a existência de um possível padrão entre os dados de saída desta PCF. Entre tais métodos, destacaram-se os 4 resultados obtidos pelos classificadores bayesianos: Análise Linear Discriminante – LDA e Análise Quadrática Discriminante – QDA. Suas estratégias de validação foram: Leave-one-out e 5-fold. A Tabela 2 exibe os resultados obtidos por tais classificadores.

Tabela 2 – Registros dos resultados das simulações realizadas com os classificadores bayesianos LDA e QDA.

Validação	Classificador LDA	Classificador QDA
Leave-one-out	44,0%	44,5%
5-Fold	43,6%	44,3%

Fonte: Rodrigues *et al.* (2019).

A análise destes dados aponta baixa eficiência dos classificadores bayesianos com suas respectivas estratégias de validação. Entretanto, apesar de serem informações com baixas taxas de acertos, serviram de incentivo, pois a partir destes resultados, percebeu-se que poderia haver padrões nos dados e certamente algum método de solução para o problema.

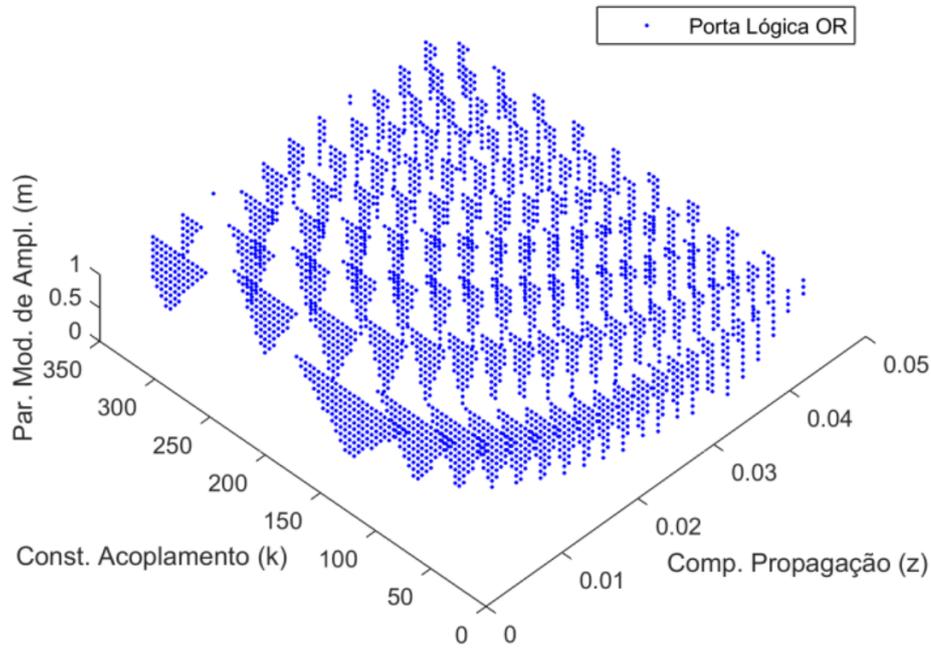
4.3.1 Análise do comportamento da Porta lógica OR

A análise dos resultados e combinações da saída lógica *OR – OR* ao longo das variações dos parâmetros de k , z e m mostram que existe uma relação padrão entre o comportamento destes dados. Analisando as Figuras 16 e 17 percebe-se esta correlação.

Analisando a Figura 16, percebe-se a existência de uma relação entre comprimento de propagação (z), constante de acoplamento (k) e parâmetro de modulação de amplitude (m). Nesta, fica evidente a existência de diversas curvas semelhantes e de mesma saída lógica (*OR – OR*). Também é fácil perceber que o maior agrupamento da porta lógica *OR* acontece na ocorrência de pequenos valores de comprimento de propagação (z) e grandes valores de parâmetro de modulação de amplitude (m). Para analisar e fundamentar melhor estes dados, fixou-se o parâmetro de modulação de amplitude (m) em 0,9, ver Figura 17.

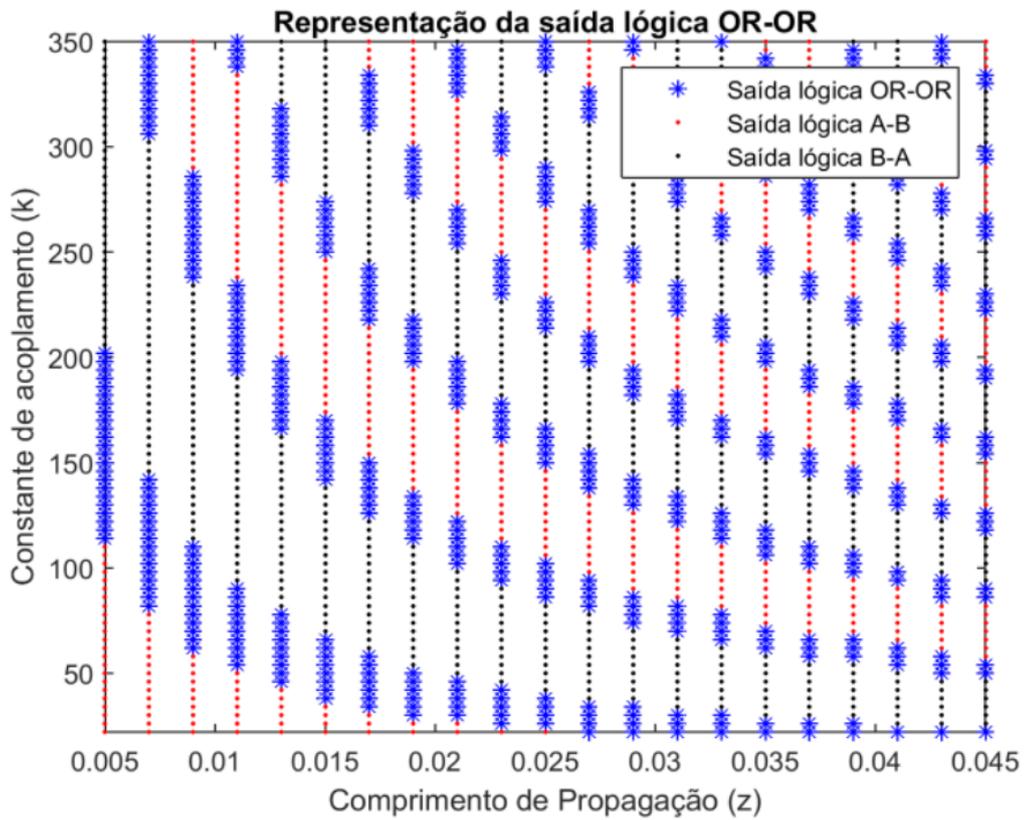
Os asteriscos, em azul, representam a combinação lógica *OR – OR* ($S_3 = 0111$ e

Figura 16 – Representação das saídas da porta lógica OR em 3D em função de κ , z e m



Fonte: Rodrigues *et al.* (2019).

Figura 17 – Representação 2D da combinação lógica OR-OR (Asteriscos), A-B (pontos vermelhos) e B-A (pontos pretos) com amplitude fixa.



Fonte: Rodrigues *et al.* (2019).

$S_4 = 0111$), plotados na Figura 16, os pontos vermelhos representam a combinação lógica $A - B$ ($S_3 = 0011$ e $S_4 = 0101$) e os pontos pretos representam a combinação lógica $B - A$ ($S_3 = 0101$ e $S_4 = 0011$).

Explorando a relação entre os parâmetros κ , z e m nas Figuras 16 e 17, podemos utilizar um simples algoritmo de regressão ou interpolação e fazer as seguintes observações:

1. As combinações lógicas de saídas (OR-OR, A-B e B-A) surgem de forma periódica ao longo do espaço;
2. O intervalo em κ , $\Delta\kappa$, para cada tipo de combinação lógica varia com o comprimento de acoplamento pela relação $\Delta\kappa = 0,416/z$ e com o parâmetro de modulação com $\Delta\kappa = 104 \times m - 4,8$;
3. O intervalo médio em κ , $\Delta\kappa$, em cada curva de saída é aproximadamente constante para dados valores fixos de z e m ;
4. A soma dos intervalos de ocorrência da saída lógica em κ , $\Sigma\Delta\kappa$, é aproximadamente constante e independe de z e m ;
5. As curvas médias de cada saída independem do parâmetro de modulação m e obedecem a relação $kz = a$, onde o valor de a varia linearmente entre as curvas de uma mesma saída lógica.
6. Os valores de a para cada curva estão distribuídos de forma linear tal que $a = \frac{\pi}{2} \times c - \frac{\pi}{4}$, em que c é a ordem da curva. Assim para a 1ª curva temos, $c = 1$ e $a = \frac{\pi}{4}$, para a 2ª curva, $c = 2$ e $a = \frac{3\pi}{4}$, e assim por diante.

Estas observações indicam que, para um dado valor de m , temos um surgimento periódico de curvas de cada saída lógica. Para a saída lógica OR-OR, teremos curvas na forma $kz = \frac{\pi}{2} \times c - \frac{\pi}{4}$. Isso significa que a primeira curva da saída OR-OR surge em $a = \frac{\pi}{4}$, logo temos, a Expressão 4.2:

$$\begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) & i \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \\ i \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+m \\ 1-m \end{bmatrix} \text{ ou } \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & i \frac{1}{\sqrt{2}} \\ i \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+m \\ 1-m \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

Este é um resultado já conhecido na literatura, e foi descrito por (REIS *et al.*, 2012). Isso mostra que a análise realizada, usando redes neurais, é válida.

4.3.2 Análise da Rede MLPs

Os resultados obtidos pela análise da rede MLPs foram muito bons, permitindo concluir com precisão que existe uma relação padrão entre os parâmetros físicos e os sinais binários de saída desta PCF. Das diversas simulações, destacamos quatro, e suas acurácias estão descritas na Tabela 3, portanto temos:

1. Simulação de rede MLPs com 2 camadas ocultas (10 e 20 neurônios, respectivamente);
2. Simulação de rede MLPs com 2 camadas ocultas (10 e 20 neurônios, respectivamente), com normalização (*zscore*);
3. Simulação de rede MLPs com 3 camadas ocultas (10, 20 e 10 neurônios, respectivamente);
4. Simulação de rede MLPs com 3 camadas ocultas (10, 20 e 10 neurônios, respectivamente) com normalização (*zscore*).

A Tabela 3, exibe os resultados das taxas de acertos obtidas nas simulações para os 4 casos.

Tabela 3 – Taxa de acertos da MLP aplicada à base de dados do acoplador duplo simétrico em 4 simulações

Rede Neural	2 camadas ocultas	3 camadas ocultas
MLP	96,53%	98,71%
MLP(<i>zscore</i>)	97,43%	98,71%

Fonte: Rodrigues *et al.* (2019).

Em todas as simulações, foram selecionados 70% dos dados para treino e 30% para teste. Na simulação 1, com duas camadas ocultas, nossos resultados apontaram uma taxa de acerto de 96,53%. Normalizando (*zscore*) a base de dados da MLP na simulação 2, obtivemos agora 97,43% de acerto, melhorando em 0,9% a taxa de acertos em relação à simulação 1. Então, aumentando uma camada à simulação inicial, a MLP agora com 3 camadas ocultas na simulação 3, obteve uma taxa de acerto de 98,71%, uma melhora de 1,28% em relação à simulação 2. Por fim, aplicamos a normalização *zscore* à MLP com 3 camadas ocultas na simulação 4, e percebemos que o percentual de acertos em relação a simulação 3 permaneceu inalterado. Assim, levando em consideração a taxa de acertos e a simplicidade da rede, temos que, das várias combinações testadas, a de melhor performance foi a simulação 3, com 3 camadas ocultas e sem normalização.

4.4 Conclusão

Neste trabalho, foi apresentado um estudo que demonstra a correlação entre os pulsos ópticos de saída de um acoplador fotônico duplo simétrico de PCF e suas características físicas da fibra. Para isto, simulou-se uma RNA usando uma técnica que analisa os pulsos de saída da PCF e os correlaciona aos seus respectivos parâmetros físicos. Desta forma, as características físicas que geram os sinais de saída são usados como dados de treinamento e análise da RNA. Os parâmetros físicos são variados e os pulsos solitônicos bombeados tem amplitudes também variadas. Assim, foi projetada uma rede neural capaz de identificar portas lógicas específicas com base apenas nos parâmetros físicos que geram estas saídas. Os resultados obtidos mostram que a rede neural é capaz de aprender o comportamento periódico e as relações existentes entre os parâmetros físicos: constante de acoplamento κ , comprimento de propagação z e parâmetro de modulação de amplitude m . Assim, foi obtida a porta lógica OR, cujos sinais foram classificados com precisão de 98,71%. Desta forma, a análise e os resultados descritos sobre este dispositivo de acoplamento demonstram que a RNA proposta é capaz de reconhecer relações entre os parâmetros físicos e os sinais de saída de um dispositivo lógico de PCF e que as MLPs são ferramentas de grande importância e eficiência para o reconhecimento destes padrões, auxiliando os sistemas de transmissão de telecomunicações.

5 PUBLICAÇÕES RELACIONADAS E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Publicações relacionadas

1. MARTINS, F. L. B.; RODRIGUES, J. P. T.; NETO, F.; NASCIMENTO, J. C.; JR, A. C.; FRAGA, W. 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.
2. RODRIGUES, J. P. T.; PINTO, R. F. J.; NASCIMENTO, J. C.; Sá, J. J. M. J. Reconhecimento de Portas Lógicas em Fibras de Cristal Fotônico utilizando Redes Neurais Perceptrons de Múltiplas Camadas. **Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBrT**, 2019.

5.2 Trabalhos Futuros

1. Dispositivos Ópticos Lógicos Programáveis em PCFs.

Neste trabalho serão apresentados dispositivos ópticos lógicos programáveis constituídos apenas de PCF.

2. Redes Neurais aplicadas a Dispositivos Ópticos.

O estudo pretende dar sequência ao trabalho intitulado: Reconhecimento de Portas Lógicas em Fibras de Cristal Fotônico utilizando Redes Neurais Perceptrons de Múltiplas Camadas.

3. Estudo sobre as modulações.

Este estudo propõe uma modulação que resolve fan-in e fan-out em circuitos ópticos lineares.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, G. Nonlinear fiber optics, acad. **Press, San Diego**, 1989.
- AGRAWAL, G. **Applications of nonlinear fiber optics**. [S.l.]: Elsevier, 2001.
- AGRAWAL, G. **Nonlinear fiber optics**. [S.l.]: Elsevier, 2007.
- AGRAWAL, G. P. Nonlinear fiber optics. In: **Nonlinear Science at the Dawn of the 21st Century**. [S.l.]: Springer, 2000. p. 195–211.
- AGRAWAL, G. P. **Fiber-optic communication systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012. v. 222.
- ALMEIDA, J. de; MENEZES, J.; SILVA, M. D.; SOMBRA, A.; FRAGA, W.; SALES, J.; FERREIRA, A.; MARCIANO, S.; FILHO, A. Logic gates based in asymmetric couplers: Numerical analysis. **Fiber and integrated optics**, Taylor & Francis, v. 26, n. 4, p. 217–228, 2007.
- ARAÚJO, A.; OLIVEIRA, A.; MARTINS, F.; COELHO, A.; FRAGA, W.; NASCIMENTO, J. Two all-optical logic gates in a single photonic interferometer. **Optics Communications**, Elsevier, v. 355, p. 485–491, 2015.
- ASHCROFT, N. Física do estado sólido.[sl]: Cengage learning, são paulo. 2011.
- BIOLATTI, E.; IOTTI, R. C.; ZANARDI, P.; ROSSI, F. Quantum information processing with semiconductor macroatoms. **Physical review letters**, APS, v. 85, n. 26, p. 5647, 2000.
- BIRKS, T. A.; KNIGHT, J. C.; RUSSELL, P. S. J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber. **Optics letters**, Optical Society of America, v. 22, n. 13, p. 961–963, 1997.
- BRODERICK, N.; MONRO, T.; BENNETT, P.; RICHARDSON, D. Nonlinearity in holey optical fibers: measurement and future opportunities. **Optics Letters**, Optical Society of America, v. 24, n. 20, p. 1395–1397, 1999.
- BROENG, J.; MOGILEVSTEV, D.; BARKOU, S. E.; BJARKLEV, A. Photonic crystal fibers: A new class of optical waveguides. **Optical fiber technology**, Elsevier, v. 5, n. 3, p. 305–330, 1999.
- CARUSO, F.; OGURI, V. **Física Moderna: origens clássicas e fundamentos quânticos**. [S.l.]: Elsevier, 2006.
- CHIANG, K. S. Intermodal dispersion in two-core optical fibers. **Optics letters**, Optical Society of America, v. 20, n. 9, p. 997–999, 1995.
- CHIANG, K. S. Propagation of short optical pulses in directional couplers with kerr nonlinearity. **JOSA B**, Optical Society of America, v. 14, n. 6, p. 1437–1443, 1997.
- COELHO, A.; COSTA, M.; FERREIRA, A.; SILVA, M. D.; LYRA, M.; SOMBRA, A. Realization of all-optical logic gates in a triangular triple-core photonic crystal fiber. **Journal of lightwave technology**, IEEE, v. 31, n. 5, p. 731–739, 2012.
- COPPIN, B. **Inteligência artificial**. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2015.

COSTA, M. B. C. Análise numérica do acoplador duplo não-linear baseado em fibras de cristais fotônicos (nlhc-pcf) operando com pam e pwm para obtenção de portas lógicas. 2013.

CREGAN, R.; MANGAN, B.; KNIGHT, J.; BIRKS, T.; RUSSELL, P. S. J.; ROBERTS, P.; ALLAN, D. Single-mode photonic band gap guidance of light in air. **science**, American Association for the Advancement of Science, v. 285, n. 5433, p. 1537–1539, 1999.

CRYSTALS, P. Molding the flow of light. **Princeton University**, 2008.

DROULIAS, S.; MANOUSAKIS, M.; HIZANIDIS, K. Switching dynamics in nonlinear directional fiber couplers with intermodal dispersion. **Optics communications**, Elsevier, v. 240, n. 1-3, p. 209–219, 2004.

FERRANDO, A.; SILVESTRE, E.; ANDRÉS, P.; MIRET, J. J.; ANDRÉS, M. V. Designing the properties of dispersion-flattened photonic crystal fibers. **Optics Express**, Optical Society of America, v. 9, n. 13, p. 687–697, 2001.

FERRANDO, A.; SILVESTRE, E.; MIRET, J.; MONSORIU, J.; ANDRES, M.; RUSSELL, P. S. J. Designing a photonic crystal fibre with flattened chromatic dispersion. **Electronics letters**, IET, v. 35, n. 4, p. 325–327, 1999.

FERRANDO, A.; SILVESTRE, E.; MIRET, J.; ANDRES, P. Nearly zero ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers. **Optics Letters**, Optical Society of America, v. 25, n. 11, p. 790–792, 2000.

FERREIRA, A. d. C.; SOBRINHO, C.; MENEZES, J.; FRAGA, W.; ROCHA, H.; JR, A. W. L.; SABÓIA, K.; GUIMARÃES, G.; FILHO, J.; SOMBRA, A. A performance study of an all-optical logic gate based in pam-ask. **Journal of Modern Optics**, Taylor & Francis, v. 56, n. 8, p. 1004–1013, 2009.

FINAZZI, V.; MONRO, T. M.; RICHARDSON, D. J. Small-core silica holey fibers: nonlinearity and confinement loss trade-offs. **JOSA B**, Optical Society of America, v. 20, n. 7, p. 1427–1436, 2003.

FRAGA, W.; MENEZES, J.; SILVA, M. D.; SOBRINHO, C.; SOMBRA, A. All optical logic gates based on an asymmetric nonlinear directional coupler. **Optics Communications**, Elsevier, v. 262, n. 1, p. 32–37, 2006.

HAMEED, M.; OBAYYA, S.; AL-BEGAIN, K.; NASR, A.; MAATY, M. A. E. Accurate radial basis function based neural network approach for analysis of photonic crystal fibers. **Optical and quantum electronics**, Springer, v. 40, n. 11-12, p. 891, 2008.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. [S.l.]: Bookman Editora, 2007.

INOUE, K.; OHTAKA, K. **Photonic crystals: physics, fabrication and applications**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2004. v. 94.

JOANNOPOULOS, J. D.; JOHNSON, S. G.; WINN, J. N.; MEADE, R. D. Molding the flow of light. **Princeton Univ. Press, Princeton, NJ [ua]**, 2008.

JR, S. A. C. Recent progress and novel applications of photonic crystal fibers. **Reports on progress in physics**, IOP Publishing, v. 73, n. 2, p. 024401, 2010.

KERRINCKX, E.; BIGOT, L.; DOUAY, M.; QUIQUEMPOIS, Y. Photonic crystal fiber design by means of a genetic algorithm. **Optics Express**, Optical Society of America, v. 12, n. 9, p. 1990–1995, 2004.

KHAN, K. R.; WU, T. X.; CHRISTODOULIDES, D. N.; STEGEMAN, G. I. Soliton switching and multi-frequency generation in a nonlinear photonic crystal fiber coupler. **Optics Express**, Optical Society of America, v. 16, n. 13, p. 9417–9428, 2008.

KNIGHT, J.; ARRIAGA, J.; BIRKS, T.; ORTIGOSA-BLANCH, A.; WADSWORTH, W.; RUSSELL, P. S. J. Anomalous dispersion in photonic crystal fiber. **IEEE photonics technology letters**, IEEE, v. 12, n. 7, p. 807–809, 2000.

KNIGHT, J.; BIRKS, T.; ATKIN, D.; RUSSELL, P. S. J. Pure silica single-mode fibre with hexagonal photonic crystal cladding. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. **Optical Fiber Communication Conference**. [S.l.], 1996. p. PD3.

KNIGHT, J.; BIRKS, T.; RUSSELL, P. S. J.; ATKIN, D. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding. **Optics letters**, Optical Society of America, v. 21, n. 19, p. 1547–1549, 1996.

KNIGHT, J. C.; BROENG, J.; BIRKS, T. A.; RUSSELL, P. S. J. Photonic band gap guidance in optical fibers. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 282, n. 5393, p. 1476–1478, 1998.

KUHLMEY, B. T.; MCPHEDRAN, R. C.; STERKE, C. M. de; ROBINSON, P. A.; RENVERSEZ, G.; MAYSTRE, D. Microstructured optical fibers: where's the edge? **Optics Express**, Optical Society of America, v. 10, n. 22, p. 1285–1290, 2002.

LEE, S.; PARK, J.; LEE, K.; EOM, D.; LEE, S.; KIM, J. H. All-optical exclusive nor logic gate using mach-zehnder interferometer. **Japanese journal of applied physics**, IOP Publishing, v. 41, n. 10B, p. L1155, 2002.

LIU, M.; CHIANG, K. S. Propagation of ultrashort pulses in a nonlinear two-core photonic crystal fiber. **Applied Physics B**, Springer, v. 98, n. 4, p. 815–820, 2010.

MALHEIROS-SILVEIRA, G. N.; HERNANDEZ-FIGUEROA, H. E. Prediction of dispersion relation and pbgs in 2-d pcs by using artificial neural networks. **IEEE Photonics Technology Letters**, IEEE, v. 24, n. 20, p. 1799–1801, 2012.

MALHEIROS-SILVEIRA, G. N.; RODRIGUEZ-ESQUERRE, V. F.; HERNANDEZ-FIGUEROA, H. E. Strategy of search and refinement by ga in 2-d photonic crystals with absolute pbg. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, IEEE, v. 47, n. 4, p. 431–438, 2011.

MANGAN, B.; KNIGHT, J.; BIRKS, T.; RUSSELL, P. S. J.; GREENAWAY, A. Experimental study of dual-core photonic crystal fibre. **Electronics Letters**, IET, v. 36, n. 16, p. 1358–1359, 2000.

MARTINS, F.; RODRIGUES, J.; NETO, F.; NASCIMENTO, J.; JR, A. C.; FRAGA, W. Two and three-input all-optical logic gates on a planar three-core photonic crystal fiber. **Optik**, Elsevier, v. 154, p. 516–523, 2018.

MENEZES, J.; FRAGA, W. D.; GUIMARÃES, G.; FERREIRA, A.; ROCHA, H.; SILVA, M. D.; SOMBRA, A. Optical switches and all-fiber logical devices based on triangular and planar three-core nonlinear optical fiber couplers. **Optics communications**, Elsevier, v. 276, n. 1, p. 107–115, 2007.

OKUNO, T.; ONISHI, M.; KASHIWADA, T.; ISHIKAWA, S.; NISHIMURA, M. Silica-based functional fibers with enhanced nonlinearity and their applications. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, IEEE, v. 5, n. 5, p. 1385–1391, 1999.

OUZOUNOV, D. G.; AHMAD, F. R.; MÜLLER, D.; VENKATARAMAN, N.; GALLAGHER, M. T.; THOMAS, M. G.; SILCOX, J.; KOCH, K. W.; GAETA, A. L. Generation of megawatt optical solitons in hollow-core photonic band-gap fibers. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 301, n. 5640, p. 1702–1704, 2003.

PASCHOTTA, R. *et al.* **Encyclopedia of laser physics and technology**. [S.l.]: Wiley-vch Berlin, 2008. v. 1.

PERNICE, W. H.; SCHUCK, C.; MINAEVA, O.; LI, M.; GOLTSMAN, G.; SERGIENKO, A.; TANG, H. High-speed and high-efficiency travelling wave single-photon detectors embedded in nanophotonic circuits. **Nature communications**, Nature Publishing Group, v. 3, p. 1325, 2012.

POLI, F.; CUCINOTTA, A.; SELLERI, S. **Photonic crystal fibers: properties and applications**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007. v. 102.

POLI, F.; CUCINOTTA, A.; SELLERI, S.; BOUK, A. Tailoring of flattened dispersion in highly nonlinear photonic crystal fibers. **IEEE Photonics Technology Letters**, IEEE, v. 16, n. 4, p. 1065–1067, 2004.

PREBLE, S.; LIPSON, M.; LIPSON, H. Two-dimensional photonic crystals designed by evolutionary algorithms. **Applied Physics Letters**, AIP, v. 86, n. 6, p. 061111, 2005.

RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K.; SASAKI, G. **Optical networks: a practical perspective**. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2009.

REIS, C.; CHATTOPADHYAY, T.; ANDRÉ, P.; TEIXEIRA, A. Single mach–zehnder interferometer based optical boolean logic gates. **Applied optics**, Optical Society of America, v. 51, n. 36, p. 8693–8701, 2012.

RODRIGUES, J. P. T.; MARTINS, F. L. B.; PINTO, R. F. J.; NASCIMENTO, J. C.; Sá, J. J. M. J. Reconhecimento de portas lógicas em projeto de acopladores de fibra de cristal fotônico. **XXXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBrT**, 2019.

RODRÍGUEZ-ESQUERRE, V. F.; ISÍDIO-LIMA, J.; DOURADO-SISNANDO, A.; SILVA, F. S. Artificial neural networks for the chromatic dispersion prediction of photonic crystal fibers. **Microwave and Optical Technology Letters**, Wiley Online Library, v. 55, n. 9, p. 2179–2181, 2013.

RUSSELL, P. Photonic crystal fiber: finding the holey grail. **Optics and photonics news**, Optical Society of America, v. 18, n. 7, p. 26–31, 2007.

SAITOH, K.; KOSHIBA, M. Numerical modeling of photonic crystal fibers. **Journal of Lightwave Technology**, IEEE, v. 23, n. 11, p. 3580, 2005.

SAITOH, K.; KOSHIBA, M.; HASEGAWA, T.; SASAOKA, E. Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion. **Optics Express**, Optical Society of America, v. 11, n. 8, p. 843–852, 2003.

SANG, X.; CHU, P. L.; YU, C. Applications of nonlinear effects in highly nonlinear photonic crystal fiber to optical communications. **Optical and Quantum Electronics**, Springer, v. 37, n. 10, p. 965–994, 2005.

SHIGA, K.; ANDOH, K.; IMAI, M.; IMAI, Y. *et al.* All-optical switching and coupling characteristics of femtosecond pulses in a nonlinear fiber directional coupler. , , p. 101–107, 2004.

SHIN, W.; LEE, Y. L.; YU, B.-A.; NOH, Y.-C.; AHN, T. J. Highly sensitive strain and bending sensor based on in-line fiber mach–zehnder interferometer in solid core large mode area photonic crystal fiber. **Optics Communications**, Elsevier, v. 283, n. 10, p. 2097–2101, 2010.

SILVA, A. T. d. A. *et al.* Antenas planares reconfiguráveis do tipo v-estático e tipo defasamento de arranjo por matrizes pbg-photonic band gap-para aplicação em telefonia móvel celular. [sn], 2002.

SILVA, I. d.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas. **São Paulo: Artliber**, v. 23, n. 5, p. 33–111, 2010.

SILVA, M. G. da; SOMBRA, A. S. B. All-optical soliton switching in three-core nonlinear fiber couplers. **Optics communications**, Elsevier, v. 145, n. 1-6, p. 281–290, 1998.

SLUSHER, R. E. **Nonlinear photonic crystals**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2003. v. 10.

SOARES, P. L. B.; SILVA, J. P. da. Aplicação de redes neurais artificiais em conjunto com o método vetorial da propagação de feixes na análise de um acoplador direcional baseado em fibra ótica. **Revista Brasileira de Computação Aplicada**, v. 3, n. 2, p. 58–72, 2011.

SOTO-CRESPO, J. M.; WRIGHT, E. M. All-optical switching of solitons in two-and three-core nonlinear fiber couplers. **Journal of applied physics**, AIP, v. 70, n. 12, p. 7240–7243, 1991.

STEGEMAN, G.; WRIGHT, E. All-optical waveguide switching. **Optical and Quantum Electronics**, Springer, v. 22, n. 2, p. 95–122, 1990.

VENGSARKAR, A. M.; LEMAIRE, P. J.; JUDKINS, J. B.; BHATIA, V.; ERDOGAN, T.; SIPE, J. E. Long-period fiber gratings as band-rejection filters. **Journal of lightwave technology**, IEEE, v. 14, n. 1, p. 58–65, 1996.

VUKUSIC, P.; SAMBLES, J. R. Photonic structures in biology. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 424, n. 6950, p. 852, 2003.

ZENG, S.; ZHANG, Y.; LI, B.; PUN, E. Y.-B. Ultrasmall optical logic gates based on silicon periodic dielectric waveguides. **Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications**, Elsevier, v. 8, n. 1, p. 32–37, 2010.