



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Escalabilidade de Núcleos em Fibras de Redes Ópticas Elásticas

Luís Eduardo Luz Silva

Monografia apresentada como requisito parcial
para conclusão do Curso de Engenharia da Computação

Orientador

Prof. Dr. André Costa Drummond

Coorientador

me Italo Brasileiro

Brasília

2020

Dedicatória

Dedico a realização desse trabalho a todos aqueles que possuem conexão lenta com a internet e esperam pela existência de uma melhor prestação de serviço.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela minha vida e oportunidade de aprender;

Agradeço aos meus pais, em especial a minha mãe por ter sempre estado do meu lado me apoiando e incentivando;

Aos meus orientadores, Italo Brasileiro e André Costa Drummond pela possibilidade da realização desse trabalho;

Resumo

O crescimento da demanda por maiores capacidades de transmissão de banda passante abre oportunidades de pesquisa para a comunidade científica. As redes ópticas elásticas surgem como uma solução para atender essa crescente demanda, e se tornam alvo de estudos em suas mais diversas dimensões, como as tecnologias de transmissão, os materiais de produção das fibras, os protocolos de gerenciamento de tráfego, dentro outros. Neste trabalho, é realizada uma avaliação de redes ópticas elásticas que utilizam fibras multi-nucleadas. A avaliação considera o efeito da interferência física de diafonia em diferentes tipos de fibras no que diz respeito à quantidade de núcleos e a disposição espacial dos mesmos. O objetivo é realizar uma avaliação que possa indicar o impacto da diafonia por núcleo em diferentes tipos de fibra em cenários de redes ópticas elásticas.

Palavras-chave: EON, MCF, simulações, crosstalk

Abstract

The growing demand for higher bandwidth transmission rates opens up research opportunities for the scientific community. Elastic optical networks emerges as a solution to attend this growing demand and are now the target of studies in all its diverse dimensions, such as transmission technologies, fiber production materials, traffic management protocols, among others. In this paper, an evaluation of elastic optical networks using multi-core fibers is performed. The evaluation considers the effect of the crosstalk physical interference in different fibers types, regarding the number of cores and their spatial layout. The objective is to show an assessment that can indicate the impact of crosstalk by core on different types of fiber, for a given elastic optical network scenario.

Keywords: EON, MCF ,simulations, crosstalk

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos do trabalho	2
1.3	Organização da monografia	2
2	Fundamentação Teórica	4
2.1	As Redes ópticas Elásticas	4
2.2	MCF	8
2.3	RMCSA	11
2.3.1	SDM-EON	13
3	Diafonia	15
3.1	O impacto do XT na melhor e na pior fibra, considerando os parâmetros da fibra	19
4	Avaliação de Desempenho	22
4.1	Cenário de simulação	23
4.2	Probabilidade de Bloqueio de Circuito	24
4.3	Análise de layout das fibras para probabilidade bloqueio de circuito	26
4.4	Probabilidade de Bloqueio de Banda	27
4.5	Análise de layout das fibras para probabilidade de bloqueio de banda	29
4.6	Análise da Diafonia por núcleo de fibra	30
5	Conclusão e Trabalhos Futuros	33
5.1	Conclusão	33
5.2	Trabalhos Futuros	33
	Referências	35

Lista de Figuras

2.1	Tecnologia WDM	4
2.2	Tecnologia EON	5
2.3	BPSK	6
2.4	QPSK	7
2.5	16QAM	7
2.6	Exemplos de fibras com diferentes quantidades e disposição de núcleos . . .	8
2.7	Fibra monomodo e multimodo	9
2.8	Fibra gradual e fibra em degraus	9
2.9	Tipos de MCF quanto a elementos de redução de interferência	10
2.10	O problema RMSCA	11
2.11	Bloqueio devido as restrições de contiguidade e continuidade.	12
2.12	SDM EON	13
3.1	NEXT	16
3.2	FEXT	17
3.3	PSXT	17
3.4	AXT	18
3.5	Análise de diafonia	20
3.6	Comparação entre a melhor e a pior fibra	21
4.1	Topologia USA	23
4.2	probabilidade de bloqueio de circuito	24
4.3	probabilidade de bloqueio de circuito em fibras de 12 núcleos	26
4.4	Probabilidade de bloqueio de banda	28
4.5	Probabilidade de bloqueio de banda em fibras de 12 núcleos	29

Lista de Tabelas

3.1	Valores de parâmetros mais usados em MCF	20
4.1	Tabela resumo para probabilidade de bloqueio	26
4.2	Bloqueio de circuito, hexagonal e circular	27
4.3	Tabela do bloqueio de banda	29
4.4	Bloqueio de Banda, Hexagonal e Circular	30
4.5	Análise de bloqueio por núcleo de fibra	31

Lista de Abreviaturas e Siglas

16QAM Modulação de Amplitude em Quadratura de 16 Símbolos.

AFEXT Telediafonia Alienígena.

ANEXT Paradiafonia Alienígena.

ASE Emissão Espontânea Amplificada.

ASK Chaveamento de Mudança de Amplitude.

AXT Diafonia Alienígena.

BPSK Chaveamento por Deslocamento de Fase Binário.

CMT Teoria do Modo Acoplado.

CPT Teoria da Potência Acoplada.

EDFA Amplificador a Fibra Dopada com Érbio.

EON Rede Óptica Elástica.

FEXT Telediafonia.

FSK Chaveamento de Mudança de Frequência.

FWM Mistura de Quatro Ondas.

ITU-T Setor de Normatização da União Internacional das Telecomunicações.

MCF Fibra Multinucleada.

MIMO Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas.

NEXT Paradiafonia.

OFDM Multiplexação por Divisão Ortogonal de Frequência.

PMD Dispersão dos Modos de Polarização.

PSFEXT Telediafonia por Soma de Potência.

PSK Chaveamento de Mudança de Fase.

PSNEXT Paradiafonia por Soma de Potência.

PSXT Diafonia por Soma de Potência.

QAM Modulação de Amplitude em Quadratura.

QOT Qualidade de Transmissão.

QPSK Chaveamento por Deslocamento de Fase Quaternário.

RMCSA Roteamento, Modulação, Núcleo e Atribuição de Espectro.

ROADM Multiplexador óptico add-drop reconfigurável.

RSA Roteamento e Atribuição de Espectro.

RWA Roteamento e Atribuição de Comprimento de onda.

SDM Multiplexação por divisão espacial.

SMF Fibra Monomodo.

WDM Multiplexação por divisão de comprimento de onda.

WSS Comutador Seletivo de Comprimento de onda.

XPM Modulação de Fase Cruzada.

XT Diafonia.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Uma crescente demanda por largura de banda tem sido observada no tráfego da rede nesses últimos anos. Esse crescimento de tráfego de rede ocorre devido a tecnologias e serviços recentemente desenvolvidos por meio da web. Além de tecnologias inovadoras como celulares e aplicações móveis, como também escritório doméstico, *home-office*, serviços de transmissão de áudio e vídeo, plataformas de ensino à distância, video conferências como visto em [1].

Como, por exemplo, o uso de dados da rede no ano de 2017 foi de 122 Exabytes por mês, com a previsão de aumento desse tráfego de dados para 396 de Exabytes por mês em 2022. Já o tráfego de rede para o ano de 2017 foi em média de 45,5 TB/s, com a previsão de 147,1 TB/s para o ano de 2022.

Ainda nesse momento, houve um aumento na quantidade de dispositivos conectados na rede, assim como a velocidade média de banda larga da internet.

Foram observados, em torno de 18 bilhões de dispositivos conectados no ano de 2017 e há previsão de de que se avaliem 28,5 bilhões de dispositivos no ano de 2022. De acordo com o estudo realizado pela cisco [2].

Diante desse aumento de tráfego, são impulsionados estudos em redes ópticas para aumentar a capacidade de transmissão do enlace. Sendo assim, esta pesquisa busca obter o melhor desempenho das fibras utilizadas pela avaliação de escalabilidade em núcleos, que é capacidade de aumentar a velocidade e a capacidade de transmissão de sinal com o uso de fibras multinucleares com vários núcleos.

1.2 Objetivos do trabalho

Os objetivos gerais desta pesquisa são:

1. Avaliar o desempenho das tecnologias de Fibras Ópticas, como Fibra Multinucleada (MCF), em um cenário de Rede Óptica Elástica (EON).
2. Avaliar o bloqueio de cada fibra, de acordo com os parâmetros e cargas definidos, dentro de uma topologia em uma simulação.

Os objetivos específicos para esta pesquisa são:

1. Trabalhar com fibras MCF de diferentes layouts
2. Analisar o desempenho de fibras com diferente quantidade de núcleos considerando o bloqueio de circuito e o bloqueio de banda
3. Determinar qual seria a(s) melhor(e)s fibra(s) dentro de cada layout escolhido e de acordo com o cenário avaliado.

1.3 Organização da monografia

No capítulo 2, a princípio são apresentadas as tecnologias envolvidas para a construção deste trabalho. Neste caso, a tecnologia EON é utilizada como um aprimoramento dos recursos da tecnologia anterior, a Multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM). Em conjunto com a EON, as MCF são apresentadas como uma arquitetura de construção de fibras com possíveis disposições de núcleos, de geometrias e de elementos de redução de interferência. O problema de Roteamento, Modulação, Núcleo e Atribuição de Espectro (RMCSA) é apresentado por conta da complexidade da transmissão óptica dentro de uma fibra multinucleada. Também, é apresentada uma arquitetura de transmissão de sinal óptico utilizando componentes eletrônicos com uma MCF

As MCF estão sujeitas a interferências eletromagnéticas entre seus núcleos adjacentes, que estejam realizando a transmissão de um sinal eletromagnético. No capítulo 3, é feita uma análise de possíveis perdas de sinal por interferências que podem ocorrer dentro de uma fibra óptica. Além disso, são definidos alguns tipos de interferências nessas fibras. A seguir, são apresentadas equações que calculam a interferência entre núcleos em MCF e avalia-se cada parâmetro da equação e a sua influência para a construção e a transmissão em uma fibra óptica.

No capítulo 4, após feita a apresentação dos parâmetros e das tecnologias envolvidas na transmissão óptica para uma MCF, são feitas avaliações de performance para dois tipos de layout de fibras, com um dos layouts sendo o mais utilizado para escalar a quantidade

de núcleos durante as simulações. Após realizar a avaliação das fibras, é apresentado um relatório final em forma de tabela sobre as simulações feitas.

No capítulo 5, a partir dos dados obtidos pelas simulações, são escolhidas as fibras que serão as melhores para uma transmissão óptica em MCF de acordo com o desempenho aferido no capítulo anterior. Além disso, apresentam-se possíveis trabalhos envolvendo essa mesma temática, sobre o que poderá ser pesquisado no futuro para o capítulo

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 As Redes ópticas Elásticas

A EON é uma tecnologia de infraestrutura de rede recente, quando comparada a sua antecessora WDM. O novo conceito vindo com a EON é do grade flexível e o da Multiplexação por Divisão Ortogonal de Frequência (OFDM). Os slots são intervalos de frequências de $12.5GHz$ cada, organizados dentro do espectro disponível [3]. A grade flexível permite um melhor uso dos recursos do espectro, tornando possível adquirir uma maior velocidade de transmissão com o uso de slots agrupados. O intervalo de frequência, para uma largura de banda, utilizando a tecnologia WDM é determinado pelo Setor de Normatização da União Internacional das Telecomunicações (ITU-T), definida como uma grade fixa de $50GHz$. Com a tecnologia EON é possível estabelecer circuitos com maior largura de banda e com maior ajuste dos recursos espectrais do que tecnologias baseadas em WDM.

Para ilustrar como funciona a alocação de um recurso dentro da fibra óptica, para cada uma das tecnologias mencionadas, foi analisada a alocação dos recursos em uma fibra óptica utilizando-se as tecnologias WDM e EON, sendo referida a vantagem desta em comparação com a tecnologia WDM para a alocação de um recurso dentro da fibra óptica.

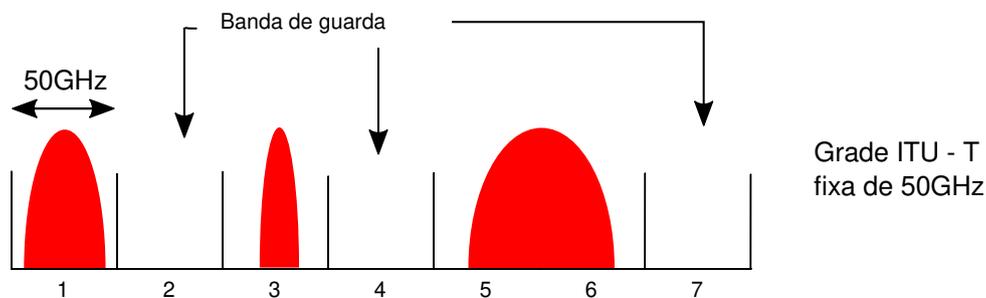


Figura 2.1: Tecnologia WDM

A partir da Figura 2.1 é possível analisar como é realizada a alocação de recurso em diferentes slots com o uso da tecnologia WDM. Essa alocação de recurso apresenta alguns espaços entre os diferentes elementos alocados justamente pela definição do padrão de canal de $50GHz$. Esses canais de $50GHz$ são fixos para a transmissão do sinal no enlace.

Caso o sinal não necessite utilizar toda a frequência disponível para um canal de transmissão com a tecnologia WDM, o restante do espectro disponível para a transmissão do sinal será desconsiderado e o tamanho do canal alocado para a transmissão da informação permanecerá fixo, com o valor de $50GHz$, desperdiçando recursos, como ocorre com o terceiro slot da figura, em que são utilizadas duas bandas de guarda ao redor do espectro alocado, usando menos do que $50GHz$. No quinto e no sexto slot, com requisição de canal no valor maior do que $50GHz$, subutiliza-se o segundo canal de $50GHz$, por não haver total proveito do espectro alocado.

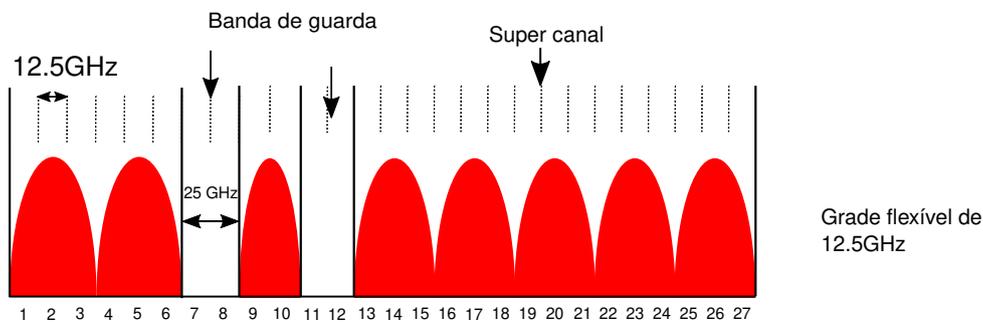


Figura 2.2: Tecnologia EON

A Figura 2.2 apresenta como é feito o gerenciamento da grade flexível com o uso da tecnologia EON. A figura evidencia a alocação do canal para uma grade de tamanho de $12.5GHz$. Contudo, também é possível encontrar na literatura a possibilidade de haver canais menores como de $6.25GHz$ [4], mas esta é menos usada por precisar de equipamentos mais complexos e sofisticados. Essa redução de canal em comparação com a antiga tecnologia representa o aumento na granularidade das divisões do espectro e uma redução da quantidade de fragmentação dos slots e, conseqüentemente, um aproveitamento melhor dos recursos. Para a separação de cada uma das alocações de espectro é definida uma banda de guarda para evitar possíveis interferências de sinal ocorridas durante a transmissão do espectro luminoso e possíveis perdas de informação. Além disso, para um canal flexível, existe o conceito de super canais. Esses canais mais longos são utilizados quando ocorre uma requisição com altas taxas de velocidade, ou quando é exigida uma modulação mais robusta com menos símbolos, aumentando o uso do espectro disponível em comparação a uma modulação com mais símbolos.

Para transmitir a informação pelo enlace, são necessários modelos de modulação, sejam eles dentro do espectro luminoso ou não. Os formatos de modulação utilizam elementos

encontrados nas características de uma onda eletromagnética para permitir a interpretação de símbolos por sinal.

As modulações que utilizam a amplitude da onda são feitas considerando o seu valor de acordo com um determinado instante e são definidas como modulações por Chaveamento de Mudança de Amplitude (ASK). Caso precise usar a frequência para modular uma onda, será necessário utilizar as modulações baseadas em Chaveamento de Mudança de Frequência (FSK). Se considerar a fase de uma onda eletromagnética para modular o sinal, essa modulação poderá ser feita pelo uso do Chaveamento de Mudança de Fase (PSK). A combinação de variações baseada na frequência e na amplitude da onda é considerada um símbolo de informação para a Modulação de Amplitude em Quadratura (QAM).

Para este trabalho, serão focadas as modulações baseadas em fase, PSK, e as modulações baseadas em quadratura, QAM, que utilizam tanto a fase como a amplitude para a formação de símbolos.

Essas modulações são utilizadas por apresentarem uma melhor imunidade ao ruído comparadas com as modulações ASK. As modulações baseadas em FSK têm a necessidade de utilizar slots de frequência fixos para a interpretação de símbolos, o que impossibilita a escolha da faixa de frequência dentro do espectro de uma fibra óptica de acordo com um comprimento de onda durante a transmissão de um laser. Por esses motivos, as modulações em fase e quadratura são as escolhidas nas simulações realizadas nesta pesquisa. As modulações baseadas em fase utilizadas neste trabalho foram as Chaveamento por Deslocamento de Fase Binário (BPSK), Chaveamento por Deslocamento de Fase Quaternário (QPSK) e a QAM.

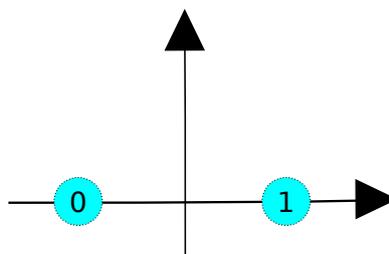


Figura 2.3: BPSK

Na modulação BPSK, representada pela Figura 2.3, a interpretação do sinal de onda digital ou analógica é feita a partir da consideração da fase da onda, sendo essa fase de referência de 180° para representar o valor zero e a fase de 0° ou 360° para o valor 1.

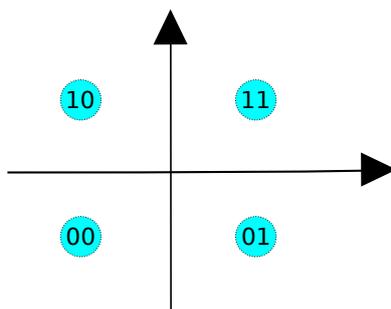


Figura 2.4: QPSK

A modulação QPSK, representada pela Figura 2.4, apresenta duas variações possíveis para a sua representação. A primeira variação QPSK(1) tem por representação os sinais elétricos pelos ângulos: 45° , 135° , 225° , 315° . Na outra variação de QPSK(2) os sinais são representados pelos seguintes ângulos: 90° , 180° , 270° , 360° . A Figura 2.4 ilustra um exemplo da modulação de QPSK do tipo 1.

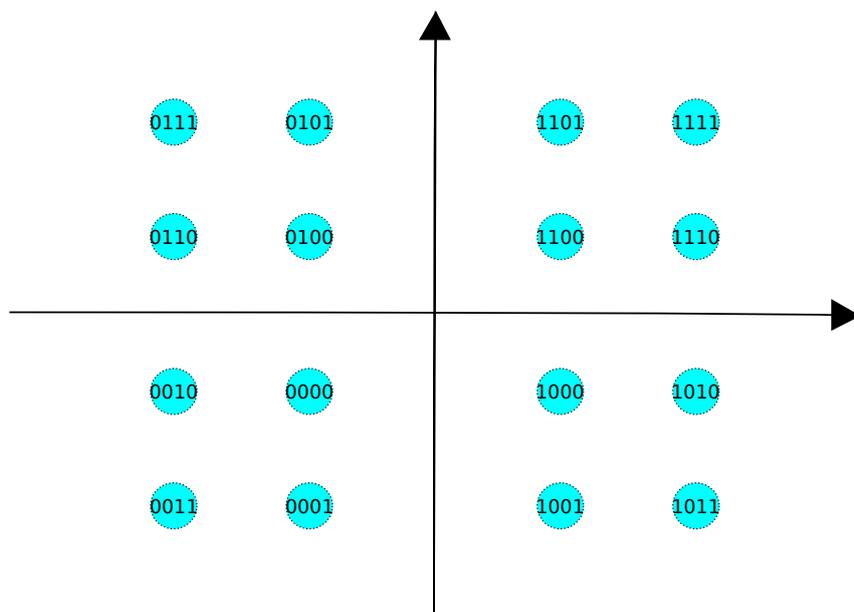


Figura 2.5: 16QAM

A Modulação de Amplitude em Quadratura de 16 Símbolos (16QAM), representada pela Figura 2.5, diferentemente da modulação PSK, considera a amplitude do sinal eletromagnético para definir seus símbolos. As modulações BPSK e QPSK utilizam a distância entre pontos baseada apenas na fase, desconsiderando possíveis valores da amplitude do sinal modulado. Para o caso apresentado de uma modulação de 4 bits com 16 combinações possíveis, é considerada também a amplitude do sinal. A referida modulação de 16 símbolos utiliza a representação de 3 circunferências para definir a distância de cada um dos símbolos, apresentando a distância entre esses pontos das circunferências como

a distância mínima do sinal. As distâncias entre cada um dos pontos da modulação QAM comparada com uma modulação PSK, para a representação de mais de 8 símbolos, são maiores. Portanto, a probabilidade de haver erro na entrega do bit é menor do que na modulação PSK. Por esse motivo, ela é bastante usada quando há a necessidade de representar mais bits com menos sinais elétricos.

2.2 MCF

O uso de MCF nos enlaces da EON tem ganhado interesse da comunidade científica. A combinação dessas duas tecnologias tem assegurado uma maior disponibilidade de recursos, pois cada núcleo da fibra multinucleada apresenta a sua quantidade de slots disponíveis e independentes entre os núcleos. Ademais, há um relaxamento na restrição óptica de continuidade, explicada na seção 2.3.

A Figura 2.6 apresenta alguns exemplos de MCF com 7 e 12 núcleos.

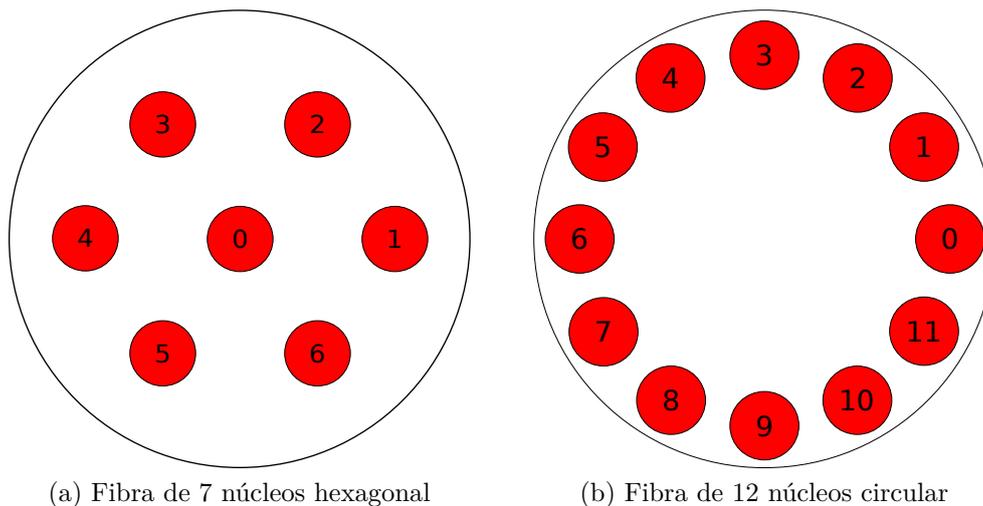


Figura 2.6: Exemplos de fibras com diferentes quantidades e disposição de núcleos

Num primeiro momento, o uso de MCF com mais núcleos garante uma maior disponibilidade de recursos. Entretanto, com o aumento no número dos núcleos, ocorre o aumento na compactação da fibra, o que resulta em uma aproximação entre os núcleos da fibra [3]. A aproximação dos núcleos da MCF gera um aumento da interferência entre os circuitos estabelecidos nos diferentes núcleos da fibra óptica, afetando a qualidade e a eficiência da transmissão. Além disso, o aumento da quantidade de núcleos pode resultar em um aumento do revestimento da fibra óptica e a redução da flexibilidade do material [3].

Além da quantidade de núcleos e da geometria, as fibras ópticas podem ser compostas por diferentes tipos de núcleos. O núcleo de uma fibra, dependendo do seu diâmetro e do índice de refração, pode ser monomodo ou multimodo.

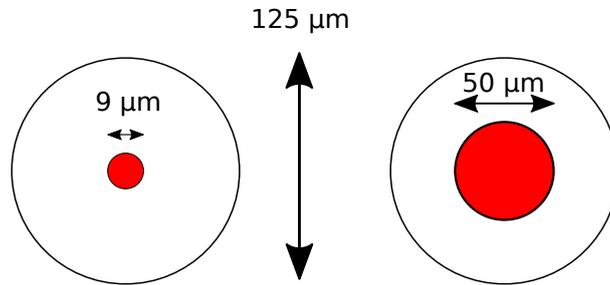


Figura 2.7: Fibra monomodo e multimodo

De acordo com a Figura 2.7, é possível ver o aumento no tamanho do núcleo quando se considera uma fibra multimodo em comparação a uma fibra monomodo. Uma fibra multimodo permite que vários feixes de luz transitem em seu núcleo por ângulos distintos de incidência. Dessa forma, alguns raios de luz chegam ao seu destino mais rápido do que outros, pois percorrem uma distância maior por apresentar um ângulo de incidência mais elevado. Caso isso ocorra, é possível que o sinal de luz seja absorvido pela fibra ou refratado com maior probabilidade. Para que uma fibra permita vários ângulos de incidência luminosa, é preciso que ela tenha um diâmetro maior.

O diâmetro de aproximadamente $50\mu m$ possibilita que a fibra multimodo não precise de um equipamento tão sofisticado para realizar a modulação e a transmissão, por ter uma área maior para conduzir o raio luminoso. Já as fibras ópticas compostas de núcleos monomodo limitam para um modo a transmissão por núcleo. Para isso, é exigido um equipamento mais preciso para transmitir o sinal [5].

Os núcleos das fibras podem ser construídos de duas formas: uma delas considera o valor de índice de refração graduado e a outra, o índice de refração por degraus.

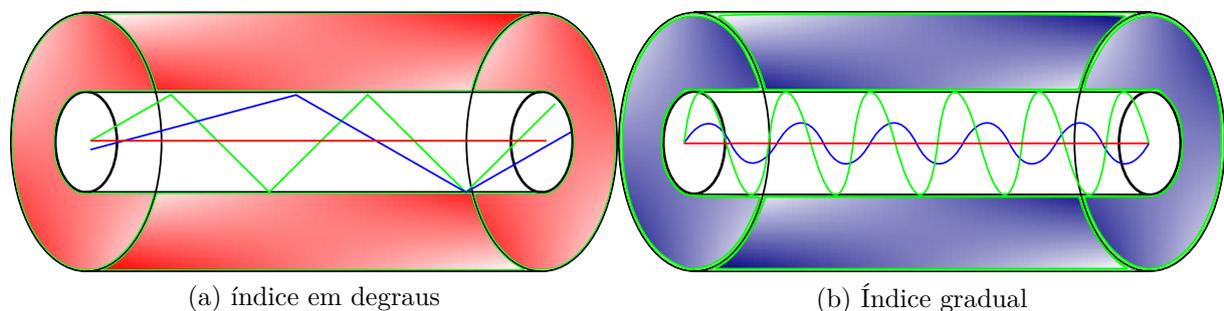


Figura 2.8: Fibra gradual e fibra em degraus

A utilização de fibra de índice gradual reduz a possibilidade de um feixe de luz ser perdido por absorção ou por refração, ao entrar em contato com o revestimento da fibra.

Para tanto, os índices de refração de uma fibra de índices graduados são modificados para que os índices próximos do revestimento sejam menores do que o índice de refração ao centro da fibra. Por esse motivo, a luz transmitida com um ângulo de incidência maior tende a atingir velocidades maiores do que a luz transmitida pelo centro da fibra. Dessa forma, mesmo que a luz com ângulo de incidência maior percorra uma distância maior, é possível que os tempos levados para percorrer a fibra sejam iguais ou próximos. Ademais, a mudança gradual do índice de refração gera um comportamento senoidal do sinal na fibra se comparado com um núcleo de índice em degraus. Assim, a propagação da luz é mais eficiente para uma fibra graduada, pois reduz perdas por reflexão, absorção e refração.

As MCF podem ser fabricadas com núcleos heterogêneos compostos por uma combinação de núcleos com índice de refração graduado ou em degraus. Entretanto, para reduzir o diâmetro total da fibra óptica e mantê-lo em $125\mu m$, é necessário utilizar núcleos pequenos, o que estimula a utilização de núcleos do formato monomodo, que permitem apenas um modo Fibra Monomodo (SMF).

Além das geometrias e as combinações distintas de núcleos, com índice graduado e em degraus, as fibras também apresentam outros elementos para reduzir a interferência que um núcleo poderá causar a outro durante uma transmissão.

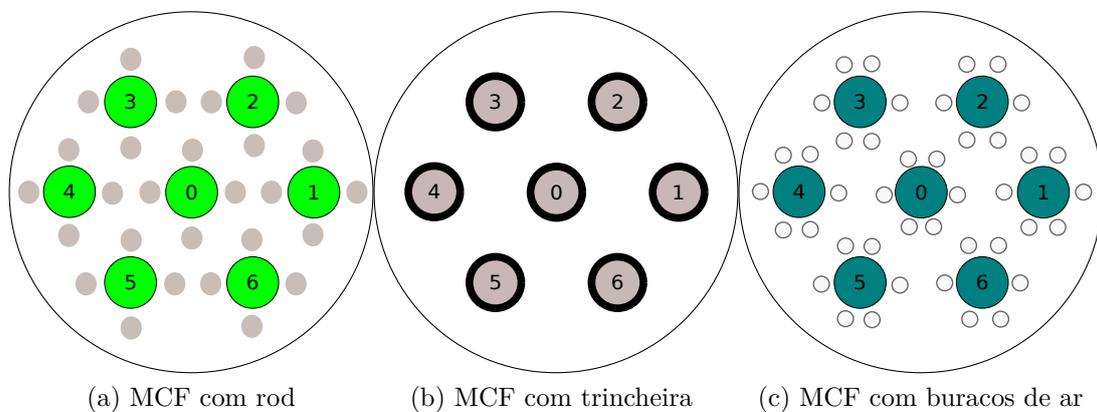


Figura 2.9: Tipos de MCF quanto a elementos de redução de interferência

Esses elementos podem ser:

1. O preenchimento dos lados dos núcleos com algum material mais refringente 2.9a.
2. A inserção de uma trincheira sobre o núcleo das fibras 2.9b.
3. A adição de buracos de ar ao redor dos núcleos das fibras 2.9c.

Para cada um desses elementos de redução de interferência podem ser analisadas as suas eficiências em relação aos custos. De acordo com a pesquisa [6], são apresentadas

essas formas de redução de interferência e é feita uma análise para o desempenho de uma fibra construída com o elemento de interferência, conforme a Figura 2.9a.

2.3 RMCSA

Para estabelecer o circuito para uma nova requisição em uma rede elástica e transmitir a banda requerida, é necessário escolher quais recursos serão alocados. O problema de atribuição de recursos consiste em Roteamento, Modulação, Núcleo e Atribuição de Espectro (RMCSA). Esse problema é bem discutido dentro da literatura de redes ópticas em geral, com as suas respectivas dependências de cenário. O problema RMSCA deve ser resolvido em etapas, transformando - o em subproblemas, que serão resolvidos dependendo de cada implementação de algoritmo escolhido. Os passos principais são definidos pelos seguintes tópicos:

1. A definição do caminho, ou conjunto de caminhos, para cada par de nós. Esta etapa é representada no sub-problema de roteamento.
2. A seleção de modulação, em que deve ser considerada a diferença de resistência à interferências da modulação para a rota dada.
3. A seleção do núcleo, baseada nos recursos disponíveis.
4. O subproblema de alocação de slot, no qual alguns slots livres ao longo da rota escolhida são reservados para o novo circuito.

A Figura 2.10 representa os passos mencionados acima para resolver o problema RMSCA.

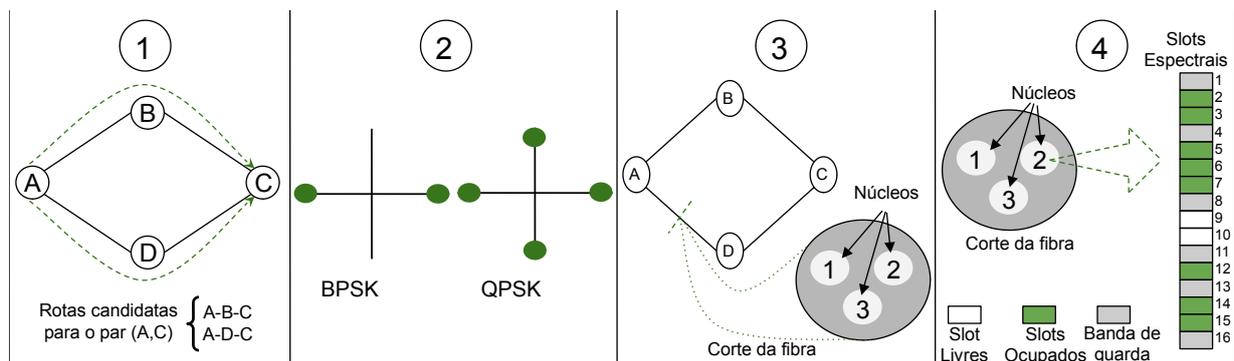


Figura 2.10: O problema RMSCA

As etapas mencionadas são fundamentais para resolver o problema genérico de alocação para um cenário EON. A etapa 1 é para calcular o caminho entre os nós fonte e

destino. Usualmente o algoritmo de Dijkstra [7] ou o KSP, k menores caminhos [8] algoritmos são utilizados nesse sub-problema, mas muitos outros algoritmos de caminho em grafo podem ser aplicados. Na Figura 2.10 a rota selecionada para o par (A,C) pode ser qualquer um dos candidatos ($A - B - C$ ou $A - D - C$). Na segunda etapa, a modulação é definida, considerando os sinais de ondas disponíveis, como o BPSK e o QPSK na Figura 2.10) e o tamanho da rota candidata selecionada na etapa anterior. Na terceira etapa, os núcleos dentro dos enlaces selecionados são organizados baseados em algum fator e aquele com melhor qualidade é escolhido. Por fim, na etapa 4, a seleção do slot segue alguma heurística para definir o melhor intervalo de slots para o sinal, dentro dos núcleos selecionados, para o novo circuito.

A fase de alocação de slots deve respeitar duas restrições do meio óptico: as restrições de continuidade e de contiguidade. A restrição de continuidade determina que o intervalo de slot escolhido tem que estar disponível em todos os links da rota selecionada. Por sua vez, a restrição de contiguidade determina que os slots selecionados devem estar adjacentes um ao outro para todo o link da rota. A Figura 2.11 ilustra um circuito que não pode ser alocado devido a uma restrição óptica.



Figura 2.11: Bloqueio devido as restrições de contiguidade e continuidade.

A Figura 2.11 mostra um circuito de dois slots por enlace, que devem ser alocados na rota selecionada. A restrição de continuidade é respeitada para os slots 5,7 e 9, mas estes não estão disponíveis, pois a restrição de contiguidade não é atendida. Então, a transmissão não pode ser realizada pela rota selecionada, mesmo que cada enlace da rota tenha slots livres. Nesse caso, é dito que o bloqueio é devido à fragmentação do espectro.

Além das restrições ópticas, as fibras ópticas estão propensas à imperfeições da camada física. Quando um intervalo de espectro é definido para o novo circuito, deve ser analisado se o nível de interferência física cria ruído a ponto de danificar o novo circuito. Se o recurso selecionado não provém Qualidade de Transmissão (QOT), outros recursos devem

ser escolhidos, até ser possível estabelecer o circuito da conexão. Se nenhum outro recurso estiver disponível, a requisição do circuito será bloqueada [9]. A Seção 2.3.1 apresenta uma das principais arquiteturas das redes com a tecnologia EON por Multiplexação por divisão espacial (SDM). O crosstalk será discutido a seguir, junto com o impacto dos parâmetros da fibra em sua intensidade.

2.3.1 SDM-EON

O uso da tecnologia SDM para a implementação dos enlaces da EON não é nova e também já foi considerada para a tecnologia WDM [10]. Essa tecnologia é a base para a implementação e a utilização de um circuito de uma rede elástica. A tecnologia de multiplexação apresenta os componentes responsáveis pela granularidade da grade de transmissão da nova tecnologia EON.

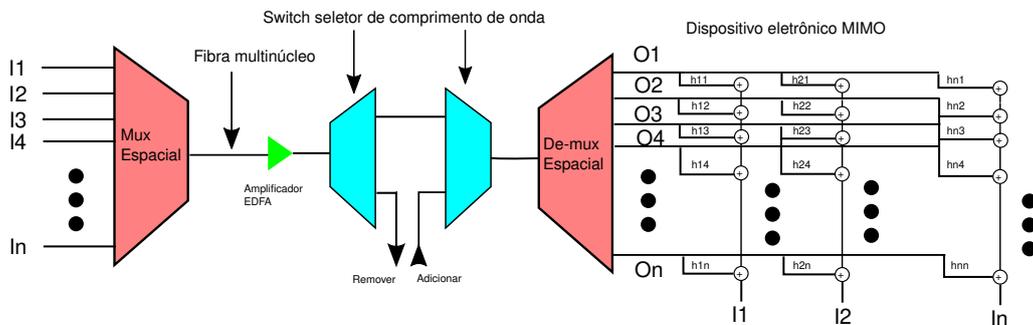


Figura 2.12: SDM EON

A transmissão luminosa, ao passar pelo primeiro multiplexador 2.12, multiplexador espacial da cor vermelha, é uma combinação dos sinais eletromagnéticos, que são ortogonais entre si. O Amplificador a Fibra Dopada com Érbio (EDFA) é adicionado [11] ao longo da fibra, distribuído em spans de aproximadamente 100km [12], que realizam a amplificação para não ocorrer perda de potência e é representado por um triângulo de cor verde na Figura 2.12.

Quando o sinal elétrico atinge o seu nó de destino, ou atravessa por um nó intermediário da conexão, é utilizado um sistema nomeado como Multiplexador óptico add-drop reconfigurável (ROADM). Dentro do ROADM há um dispositivo chamado Comutador Seletivo de Comprimento de onda (WSS), dispositivo representado pela cor ciano na Figura 2.12, em que se podem inserir circuitos para a transmissão até o próximo nó. O WSS também permite a remoção de alguns circuitos, sendo esses finalizados em seu nó. Após a verificação de quais conexões permanecerão na transmissão, o WSS realiza a multiplexação do sinal, que é transmitido para o enlace seguinte da rota. Quando a luz atinge o seu destino, é utilizado um demultiplexador espacial, representado por um trapézio

na cor vermelha na Figura 2.12, responsável pela demultiplexação do espectro de MCF. Após essa demultiplexação, são utilizados dispositivos eletrônicos para a correta decifração do sinal, que são capazes de realizarem operações com Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (MIMO), localizados na saída dos sinais de comprimento de onda do trapézio de demultiplexação espacial

Capítulo 3

Diafonia

A diafonia representa interferências eletromagnéticas, que ocorrem dentro da MCF ou durante a multiplexação do sinal na transmissão em um SDM. Essa diafonia pode comprometer os circuitos de uma transmissão ou reduzir a qualidade do sinal.

Muitos elementos físicos podem causar a perda de qualidade de sinal e reduzir a performance. Eles são divididos em três categorias [13, 14, 15],

1. Material
2. Implantação
3. Transmissão

O material da fibra é um dos elementos que podem causar perda de sinal por absorção, devido a impureza da fibra durante o processo de fabricação, e também pelos diferentes comprimentos de onda usados. Por essa razão, as bandas preferidas para o uso são C e D.

A atenuação do sinal para a implantação pode ser causada pela curvatura da fibra, na qual a luz dentro da fibra refrata diferentemente do habitual e muda o sinal inicial. Outra forma de afetar a propagação da luz dentro da fibra é a torção, na qual o modo de propagação é modificado, se considerar uma fibra de poucos modos ou uma fibra de multi-modos.

Outro problema de implantação é a micro curvatura, causada pela deformação na fibra e por elementos ao seu redor, como o peso e a pressão. Essas deformidades podem causar diferentes comportamentos da luz, afetando a reflexão ou a refração luminosa.

A transmissão do sinal pode causar diferentes interferências nos circuitos próximos. Esses efeitos são divididos em *efeitos lineares* e *não-lineares* e outras interferências [16].

Os efeitos lineares podem ser causados pela amplificação do sinal como Emissão Espontânea Amplificada (ASE), e interações de fase de onda, como Dispersão dos Modos de Polarização (PMD).

Os efeitos não lineares podem causar distorções na fase da onda de transmissão, alterar o índice de refração e produzir novas ondas, por interferências eletromagnéticas quando ocorre uma transmissão de alta potência em uma rede óptica, com a possibilidade de uma onda interferir em canais próximos. Um efeito não linear é a Modulação de Fase Cruzada (XPM), na qual uma onda pode afetar a fase de uma outra onda, por meio do efeito óptico de Kerr. Além disso, existe o Mistura de Quatro Ondas (FWM), cujas interações entre duas ou mais ondas pode produzir uma nova onda, ou inclusive amplificar o sinal de uma transmissão.

Uma interferência ocorrida dentro de uma fibra multinucleada, entre dois núcleos ou mais, é definida como Diafonia (XT) [3]. Esse tipo de interferência ocorre quando múltiplos circuitos estão transmitindo sinal em slots de frequência de mesmo índice, em núcleos de fibras próximos. Existem múltiplos subtipos de interferência que podem ser definidos como diafonia. Alguns desses subtipos são definidos como:

1. Paradiafonia (NEXT)
2. Telediafonia (FEXT)
3. Diafonia por Soma de Potência (PSXT)
4. Diafonia Alienígena (AXT)



Figura 3.1: NEXT

A paradiafonia [17], representada pela Figura 3.1, ocorre quando um sinal de interferência é localizado na mesma extremidade do cabo que gerou o sinal de transmissão para o cabo próximo a ele. Isso comumente aparece a uma distância de 20 ou 30 metros do transmissor. Este tipo de crosstalk pode acontecer também a poucos metros do transmissor, causando problemas na interpretação do sinal recebido. Uma instalação mal feita é a principal causa do crosstalk do tipo NEXT.

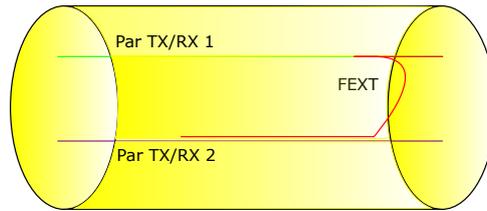


Figura 3.2: FEXT

A telediafonia [18], representada pela Figura 3.2, apresenta o mesmo comportamento da NEXT, mas a interferência do sinal ocorre em um local distinto. A interferência acontece no lado oposto do cabo em que o sinal foi enviado e próximo do receptor. Um crosstalk do tipo FEXT é mais comum em cabos pequenos do que em cabos mais longos. Entretanto, diferentemente do NEXT, a potência da transmissão ainda está elevada. Além disso, uma menor atenuação poderá resultar em um valor maior para o FEXT.

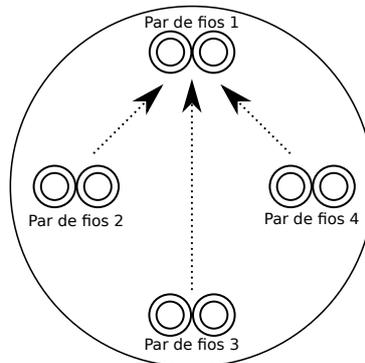


Figura 3.3: PSXT

A Diafonia por Soma de Potência [19], representada pela Figura 3.3, está também relacionada com os dois tipos de crosstalk apresentados. Este tipo de XT também deve ser considerado quando existe mais de um par de filamentos em um cabo. O PSXT é medido por meio da energia que é transferida para um par de filamentos durante a transmissão, a partir de outros pares adjacentes. Esta medida pode ser realizada em cenários distintos, considerando a diversidade de combinações possíveis entre filamentos que estão transmitindo sinal e os que não estão transmitindo.

A Diafonia Alienígena [20], representada pela Figura 3.4, ocorre quando um sinal que está sendo transmitido por um cabo perturba o sinal do outro cabo. Isso também acontece em um conjunto de cabos. A AXT depende da proximidade dos cabos adjacentes, do tamanho do cabo e do nível de torção. Este tipo de diafonia tem um cabo vítima, o cabo perturbado, e o cabo perturbador que interfere na informação vinda do outro cabo. É possível reduzir esse tipo de diafonia aumentando o espaçamento dos cabos ou alterando o tipo de revestimento utilizado, podendo até alterar o seu diâmetro.

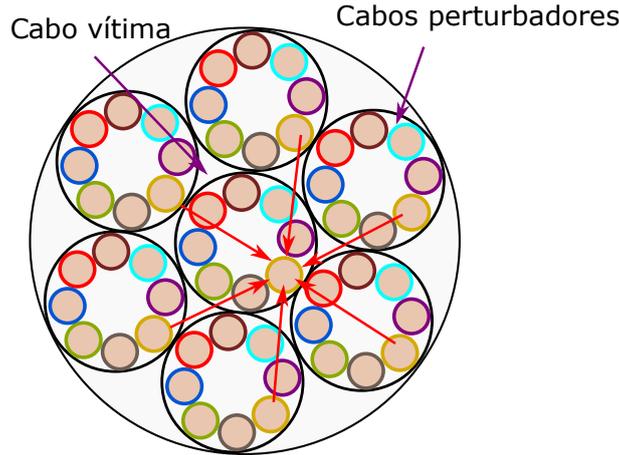


Figura 3.4: AXT

Os tipos de diafonia apresentados podem ser combinados, como por exemplo a PSXT e a AXT, que podem combinar com os tipos FEXT e NEXT, gerando tipos de diafonia definidas como Paradiafonia por Soma de Potência (PSNEXT) e Telediafonia por Soma de Potência (PSFEXT). A AXT também pode combinar com os outros dois tipos de diafonia apresentados, gerando os tipos Paradiafonia Alienígena (ANEXT) e Telediafonia Alienígena (AFEXT).

Um efeito comum de interferência de sinal em uma MCF é o XT. Isso ocorre quando existem múltiplos circuitos transmitindo sinal com a mesma frequência espectral, criando uma sobreposição de slots de frequência. O cálculo do crosstalk em MCF pode se fundamentar em duas teorias físicas principais: Teoria do Modo Acoplado (CMT) [21] e Teoria da Potência Acoplada (CPT) [22].

A teoria de modo acoplado está relacionada ao coeficiente de acoplamento, definido pela constante de propagação, a frequência da luz, a distância de dois núcleos de uma fibra MCF e o raio de curvatura.

Por outro lado, a Teoria do Modo de Potência é baseada na teoria de Conservação de Energia, para medir o crosstalk para uma fibra multinucleada como calculado em [21]. Ambas as teorias para calcular a diafonia, implicam na origem de duas novas equações baseadas em [23]:

$$h = \frac{2k^2r}{\beta\omega_{tr}} \quad (3.1)$$

Nesta fórmula, h significa o aumento médio de crosstalk por unidade de comprimento, valor adimensional, k é o coeficiente de acoplamento, que representa a perturbação óptica de um núcleo da fibra que tem por outro núcleo próximo, r é o raio de curvatura mínimo da fibra com o qual pode danificá-la ou criar micro fissuras caso reduza ainda mais esse raio, β é a velocidade de propagação da luz em uma fibra e ω_{tr} é a distância do núcleo.

Outra equação também é avaliada para calcular o valor de crosstalk:

$$XT = \frac{n - n * \exp[-(n + 1) * 2hL]}{1 + n * \exp[-(n + 1) * 2hL]} \quad (3.2)$$

A equação de XT representa o valor médio de XT em dB em uma MCF. n representa o número de vizinhos ativos para o núcleo avaliado na fibra, L é o comprimento da rota de acordo com o circuito estabelecido, e o h é a média de XT por unidade de comprimento encontrado pela Equação. 3.1.

Existem diferentes interpretações e variações para a Equação 3.2, mas apenas essa equação será considerada nesse trabalho. Com essa fórmula, é possível deduzir o que ocorrerá com os valores de XT, se os seus parâmetros forem modificados. Os componentes físicos da fibra, coeficiente de acoplamento, distância de núcleo e constante de propagação são os elementos principais para a equação de XT, especialmente para o coeficiente de acoplamento, o qual está relacionado ao comprimento de onda.

3.1 O impacto do XT na melhor e na pior fibra, considerando os parâmetros da fibra

A Equação 3.2 pode ser usada para avaliar a interferência causada para cada variável da formula, e mostrar quais variáveis tem a maior influência no valor do XT. Os próximos gráficos representam a influência de cada variável, enquanto todos os outros parâmetros são mantidos com o valor 1.

A partir dos gráficos 3.5 é possível inferir os efeitos das variáveis de 3.1 com o aumento da diafonia e então a probabilidade de bloqueio. A distância dos núcleos e a constante de propagação são consideradas as variáveis mais influentes, além do coeficiente de acoplamento e o raio de curvatura. A variável mais fácil de manipular é a distância de núcleo, pela modificação da geometria da fibra e por sua quantidade de núcleos. Como a constante de propagação é atada ao material utilizado na produção da fibra, ela permanece constante.

Junto com os gráficos da influência de cada parâmetro, é possível checar como esses parâmetros podem afetar a probabilidade de bloqueio em uma EON. A Tabela 3.1 apresenta os valores dos parâmetros encontrados em muitos artigos científicos para uma fibra óptica multinucleada. Os valores mais utilizados estão sublinhados: o valor do raio de curvatura e a distância entre núcleos, que estão em metros, o valor da constante de propagação, que está em metros por segundo, e o coeficiente de acoplamento óptico, que é adimensional. Os valores na cor azul representam o melhor valor encontrado de 3.1 e os valores na cor vermelha representam os piores valores encontrados. Com esses valores, é possível avaliar

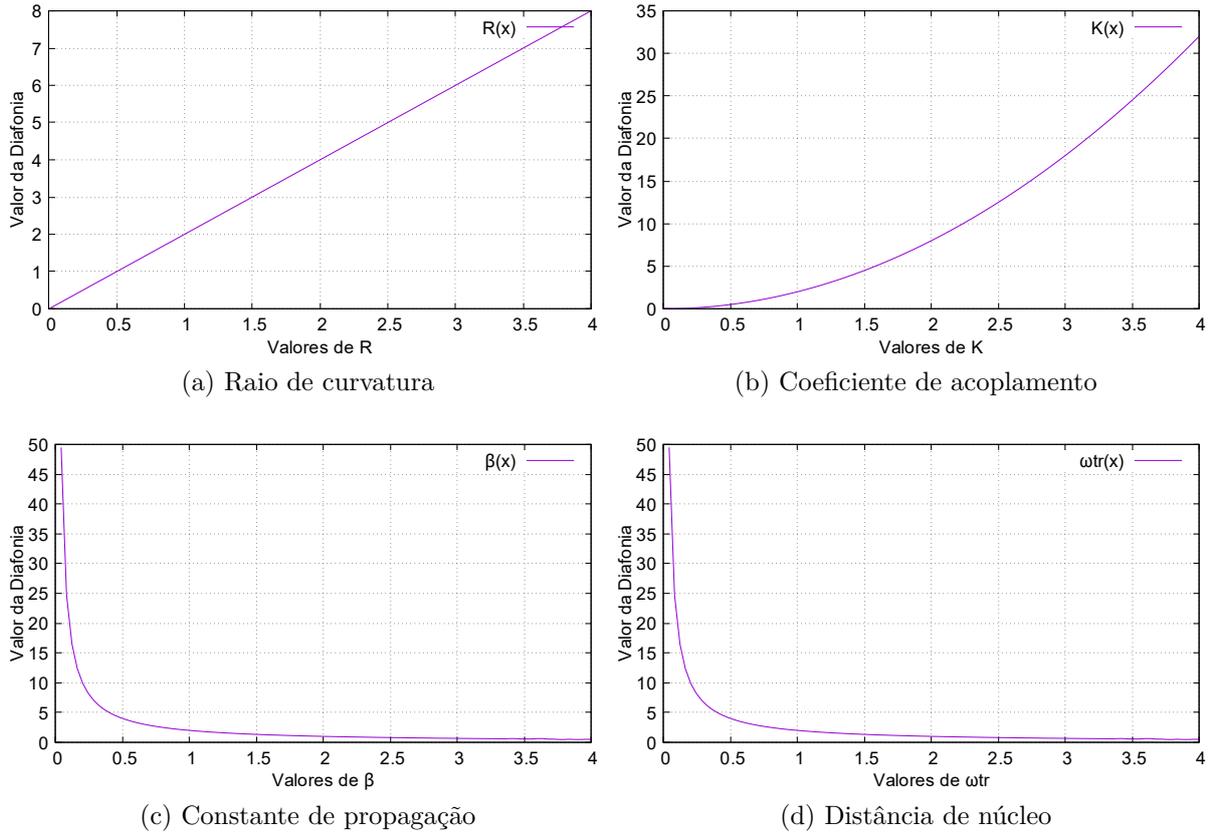


Figura 3.5: Análise de diafonia

o melhor e o pior cenário para os parâmetros pela combinação das variáveis e por meio de simulações.

Parâmetro	Valores	Referências
r	1×10^{-2} m	[24]
	5×10^{-2} m	[24]
	5.5×10^{-2} m	[25]
k	2×10^{-5}	[26]
	4.0×10^{-4}	[27]
	8.0×10^{-4}	[28]
β	1.0×10^7 m/s	[29]
	4.0×10^6 m/s	[27]
ω_{tr}	4.5×10^{-5} m	[24]
	4.0×10^{-5} m	[28]
	2.5×10^{-5} m	[30]

Tabela 3.1: Valores de parâmetros mais usados em MCF

Esses valores foram combinados e aplicados em uma rede com MCF de sete núcleos e arranjo hexagonal. Combinando esses valores, é possível checar o maior e o menor

impacto do diafonia na probabilidade de bloqueio, baseado nos parâmetros de fabricação. Portanto, a melhor combinação de valores encontrados é: $k = 2 \times 10^5$, $r = 1 \times 10^{-2}$ m, $\beta = 1.0 \times 10^7$ m/s e $\omega_{tr} = 4.5 \times 10^{-5}$ m. Já a combinação dos piores valores para os parâmetros da fibra é: $k = 2.5 \times 10^{-5}$ m, $r = 5.5 \times 10^{-2}$ m, $\beta = 4.0 \times 10^6$ m/s, $\omega_{tr} = 2.5 \times 10^{-5}$ m.

A figura 3.6 apresenta a probabilidade de bloqueio para a melhor e para a pior combinação de parâmetros de fibra óptica. Para a seguinte simulação foram usadas 5 replicações utilizando a topologia USA mostrada na Figura 4.1, com requisições de 10, 20, 80 e 200 Gbps. O número de requisições de circuito geradas na simulação foi de 10.000, e a carga varia entre 1500 e 2000 Erlangs em um passo de 100 Erlangs.

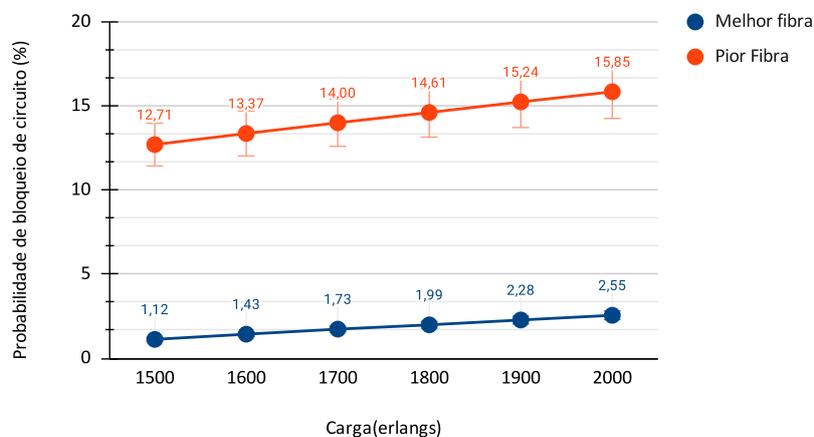


Figura 3.6: Comparação entre a melhor e a pior fibra

Com os resultados obtidos pela avaliação dos parâmetros da pior fibra e da melhor fibra, é possível analisar a influência na probabilidade de bloqueio. A pior fibra tem uma alta variação absoluta nos valores de probabilidade de bloqueio variando de 12% para 15% com o crescimento da carga. A melhor fibra apresenta uma variação de 1% para 2%. Esses parâmetros devem ser considerados para o processo de fabricação, pois eles irão afetar a performance da fibra durante o seu uso especialmente quando ela for uma fibra multinucleada.

Conclui-se que o processo de fabricação da fibra constitui um importante fator no impacto da interferência de diafonia. Por meio dos experimentos realizados, nota-se que pode haver uma redução média de até 85,72% no valor de bloqueio quando se emprega uma fibra de boa qualidade.

Para amplificar a avaliação de diafonia, o capítulo seguinte apresenta a performance com fibras de diferentes números de núcleos e de geometrias.

Capítulo 4

Avaliação de Desempenho

O simulador ONS [31] foi desenvolvido com o objetivo de poder realizar simulações em conexões de fibras ópticas por ser uma alternativa viável para realização de pesquisa e de experimentação em redes ópticas nos casos em que não há disponibilidade dos elementos físicos, como os componentes eletrônicos, lasers, fibras ópticas MCF ou um laboratório focado em simulações de redes ópticas.

A ferramenta de simulação nomeada de Optical Networks Simulator - ONS é um software escrito em código java capaz de simular os dois tipos de tecnologia de redes no caso a rede WDM e EON. O simulador é capaz de realizar simulações com tráfegos dinâmicos, com algoritmos Roteamento e Atribuição de Comprimento de onda (RWA), Roteamento e Atribuição de Espectro (RSA) e RMCSA.

Esta seção apresenta a comparação entre as fibras de diferentes números de núcleos. A avaliação considera cenários com e sem diafonia, o objetivo é verificar o impacto da diafonia em diferentes números de núcleos e de geometrias das MCF.

Uma forma de medir a performance de uma fibra multinucleada para uma experimentação no estabelecimento de um circuito de redes ópticas seria com a probabilidade de bloqueio de circuito. O uso dessa forma de avaliação visa analisar qual é o comportamento do conjunto do algoritmo e da fibra óptica para o bloqueio no estabelecimento de um circuito. Nesse caso essa métrica avalia a performance sem considerar a velocidade da requisição, tendo, portanto, uma forma mais neutra para avaliar o desempenho da rede.

A métrica da probabilidade de bloqueio está relacionada com a porcentagem dos circuitos que não poderiam ser estabelecidos dentro da rede. Para encontrar essa probabilidade de bloqueio em uma simulação, é necessário dividir a quantidade das requisições bloqueadas para o total de requisições geradas. A avaliação da probabilidade de bloqueio é a métrica mais utilizada na literatura para avaliar a qualidade de transmissão em uma rede óptica.

Além disso, esta avaliação também pode ser realizada para o algoritmo de roteamento, modulação, espectro e alocação de núcleo RMSCA em uma fibra multinucleada. Dependendo do algoritmo de alocação de recurso, quanto maior for a fragmentação de espectro criada, conseqüentemente maior será o probabilidade de bloqueio.

Ademais, o tipo de requisição do circuito pode aumentar a taxa de probabilidade de bloqueio, quando um longo caminho é requerido na conexão ou em elevadas taxas de banda.

A probabilidade de bloqueio de banda é outro tipo de avaliação de bloqueio para as conexões de circuito. A probabilidade de bloqueio de banda é uma métrica calculada pelo bloqueio da banda pela banda total gerada. Quanto maior for a banda dos circuitos bloqueados, maior serão os valores da probabilidade de bloqueio de banda, até mesmo para circuitos com pouca probabilidade de bloqueio.

4.1 Cenário de simulação

As simulações foram conduzidas pelo software ONS [31]. O método de replicação independente também foi aplicado para gerar intervalos com 95 % de nível de confiança com **5 replicações**. Cada replicação envolve 10.000 requisições com as seguintes velocidades: **10, 20, 40, 80, 160 e 200 Gbps**, todas com a mesma probabilidade.

As requisições de conexão seguem um processo de Poisson com um tempo médio de retenção de 600 segundos, de acordo com a distribuição negativa exponencial e uniformemente distribuídas de acordo com todos os pares de nós.

Para fazer essa avaliação da diafonia, os seguintes valores foram utilizados na Equação 3.2: $k = 4 \times 10^{-4}$, $r = 5 \times 10^{-2}$, $\beta = 4 \times 10^6$ e $w_{tr} = 4 \times 10^{-5}$, assim como definido em 3.1 A Figura 4.1 apresenta a topologia USA, considerada nessa avaliação.

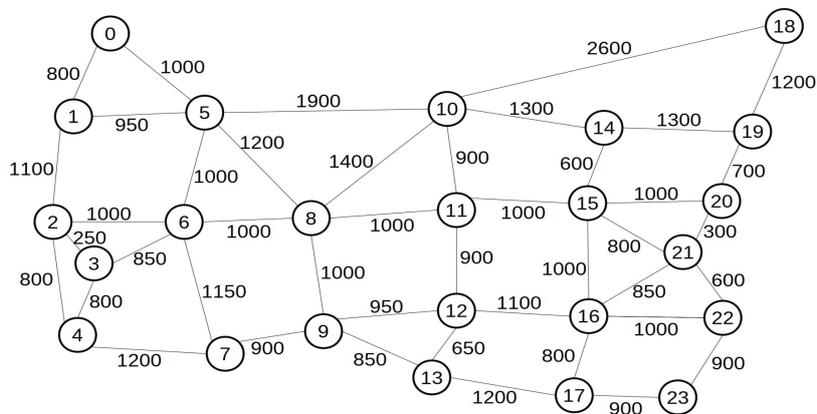
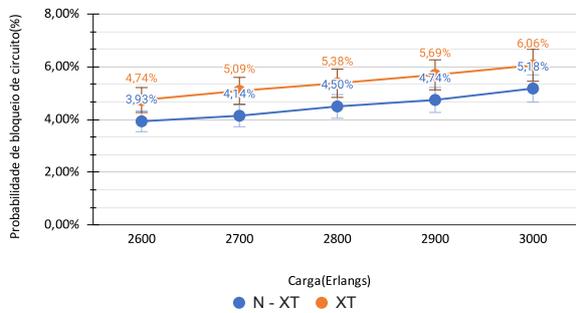


Figura 4.1: Topologia USA

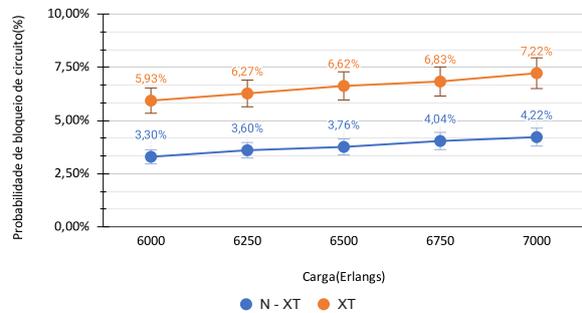
A topologia USA é composta por 24 nós e 43 links bidirecionais. O número de núcleos dentro dos links variam, de acordo com o cenário avaliado. O espectro dentro de cada núcleo é dividido em 320 slots, e cada slot apresenta uma extensão de frequência de $12.5GHZ$. A banda de guarda entre dois circuitos vizinhos é de **2 slots**. Para todos os cenários, o roteamento é realizado pelo algoritmo de Dijkstra. O núcleo e a alocação de espectro são feitos pela política de *First Fit*, primeiro ajuste.

4.2 Probabilidade de Bloqueio de Circuito

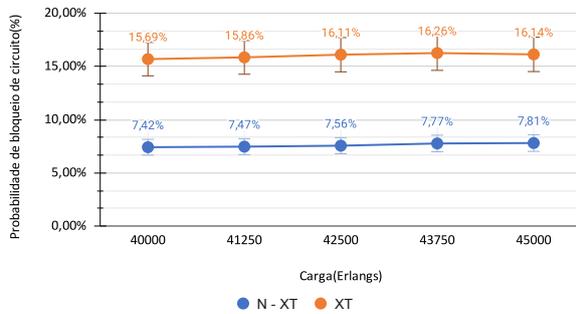
A Figura 4.2 apresenta a probabilidade de bloqueio para fibras com diferentes números de núcleos, considerando os cenários com e sem a interferência da diafonia.



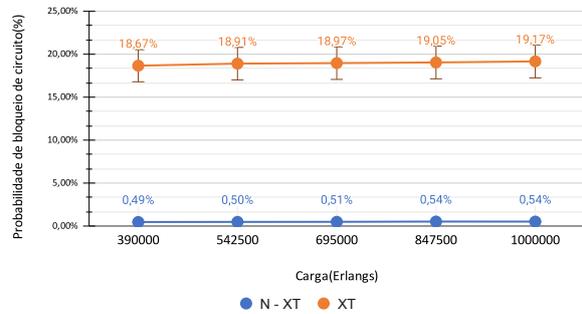
(a) Fibra de 7 núcleos



(b) Fibra de 13 núcleos



(c) Fibra de 19 núcleos



(d) Fibra de 37 núcleos

Figura 4.2: probabilidade de bloqueio de circuito

Os gráficos 4.2 apresentam o comportamento da probabilidade de bloqueio de quando o número de núcleos na fibra óptica é modificado e quando é considerada a interferência física causada pela diafonia.

A aplicação da mesma carga em todos os cenários não é possível, pois pelo aumento do número de núcleos ocorre um aumento da quantidade de recursos disponíveis.

Portanto, a carga foi ajustada para resultar em uma probabilidade de bloqueio perto de 5% para cada tipo de fibra diferente. Entretanto, não foi possível manter a taxa de bloqueio para fibras com muitos núcleos, por não poder encontrar a carga exata que pudesse causar essa taxa de bloqueio, especialmente para as fibras de 19 e de 37 núcleos. Todos os núcleos simulados na Figura 4.2 estão arranjados na mesma geometria hexagonal. Esse tipo de geometria é usado por ser considerado em muitos artigos científicos e por alguns fabricantes [32, 33, 34, 35].

Os resultados mostram uma redução na probabilidade de bloqueio quando a diafonia não está sendo considerada. Quando o número de núcleos é maior, os recursos disponíveis aumentam. Então, a fibra com um maior número de núcleos seria a preferida e a melhor fibra para alocação de recursos. Entretanto, se as interferências físicas forem consideradas, há uma separação entre os resultados da probabilidade de bloqueio, quando o cenário sem a diafonia é comparado com o cenário com diafonia. A diferença da probabilidade de bloqueio aumenta com o aumento na quantidade de núcleos, pelo fato de a fibra com geometria hexagonal implicar em uma maior quantidade de vizinhos para cada núcleo especialmente para os núcleos ao centro, os quais podem ter até 6 vizinhos.

Logo, para uma geometria hexagonal e um maior número de núcleos há aumento do número de slots disponíveis, porém ocorre maior impacto na probabilidade de bloqueio. Sendo assim, quanto maior a quantidade de núcleos a fibra possuir, maior a quantidade de slots que não serão utilizados em vista da diafonia, e a maior quantidade de vizinhos ocupando os mesmos índices de slots.

Para o cenário sem diafonia, foi possível observar valores maiores da probabilidade de bloqueio para fibra óptica de 19 núcleos comparada com a fibra de 17 núcleos. Esse fato ocorreu devido ao aumento da carga aplicada para a fibra com maior quantidade de núcleos.

A simulação realizada para o cálculo de probabilidade de bloqueio representada na Figura 4.2 apresentou variações na obtenção de seus resultados por terem sido realizadas 5 simulações para cada carga aplicada em cada fibra. A partir desses dados é possível apresentar o cálculo dos erros obtidos para cada simulação feita. A tabela 4.1 apresenta o valor médio de bloqueio por núcleo, para conjuntos de fibras em arranjo hexagonal, sob efeito de XT.

Por meio do resultado com o intervalo de confiança de 95%, pode-se obter uma análise mais profunda dos erros calculados durante as simulações. O valor do desvio padrão manteve-se próximo de 1% para as simulações realizadas dentro das 5 replicações possíveis. Pode-se observar uma variação maior de resultados a partir do aumento da quantidade de fibras ópticas, mostrado pelo aumento da margem de erro e do desvio padrão.

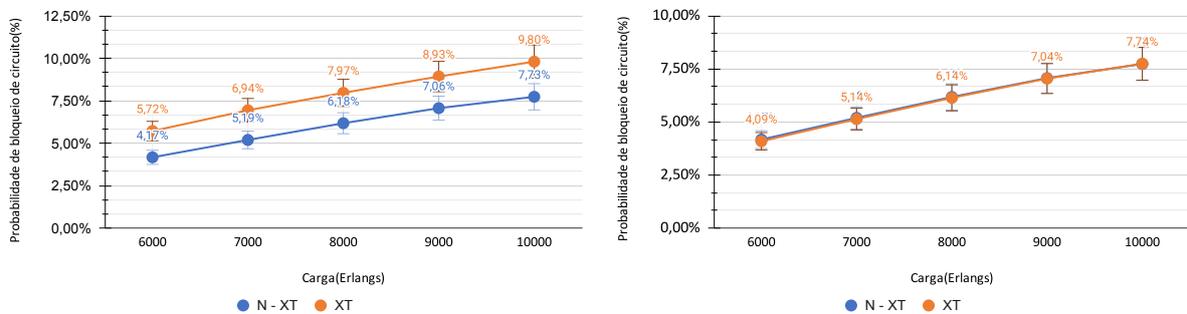
Número de núcleos	Média do Desvio Padrão (XT)	Média de bloqueio por núcleo (XT) - (N-XT)	Margem de Erro
7	0,40%	0,13%	0,04725
13	0,44%	0,21%	0,05765
19	0,97%	0,44%	0,14035
37	1,16%	0,50%	0,16612

Tabela 4.1: Tabela resumo para probabilidade de bloqueio

Além disso, o cálculo da contribuição por núcleo no probabilidade de bloqueio considerou os resultados a partir da simulação realizada com diafonia. Caso se baseie nesse resultado para a obtenção da melhor fibra no padrão hexagonal, poderia ser escolhida a fibra óptica com 13 núcleos, por esta apresentar a menor contribuição em porcentagem do XT em conjunto com um valor baixo de desvio padrão e de intervalo de confiança. Neste caso, desconsidera-se os valores utilizados sem o diafonia para se aproximar de um possível cenário real de escolha de uma fibra óptica.

4.3 Análise de layout das fibras para probabilidade bloqueio de circuito

A mudança na geometria da fibra pode ser considerada como uma tentativa de aproximar um ambiente ótimo sem diafonia para uma fibra multinucleada [36]. Outro tipo de opção seria alterar os parâmetros da fibra para atingir a melhor combinação e menor probabilidade de bloqueio, para a equação de diafonia, mas este processo implica em um perfeito processo de fabricação de fibra [37], o qual resulta em um alto custo para uma fibra multinucleada pelo motivo da alta precisão.



(a) Fibra de 12 núcleos hexagonal

(b) Fibra de 12 núcleos Circular

Figura 4.3: probabilidade de bloqueio de circuito em fibras de 12 núcleos

A avaliação da geometria é realizada como uma possibilidade de reduzir o número de núcleos vizinhos em um arranjo diferente de fibra. O número de núcleos vizinhos pode ser modificado, o que implica também na mudança de valores dos parâmetros, como o coeficiente de acoplamento e a distância de núcleo. A modificação da distância entre dois núcleos pode gerar um efeito colateral ainda que reduza o número de vizinhos para cada núcleo. A Figura 4.3 apresenta a avaliação de geometria para a topologia USA com uma fibra multinucleada de 12 núcleos.

A partir dos resultados da Figura 4.3, existe uma redução da probabilidade do bloqueio de circuito entre o cenário com diafonia e o cenário sem diafonia, comparando a Figura 4.3a com a 4.3b. Para ambos os cenários, os parâmetros de diafonia foram os mesmos. No entanto, na Figura 4.3b houve redução do número de vizinhos, negando o impacto da diafonia para a probabilidade de bloqueio de circuito, de acordo com os resultados obtidos pela ferramenta de simulação.

A mudança no formato da geometria das fibras ópticas de 12 núcleos para o formato circular e para o hexagonal gerou resultados surpreendentes para o formato circular, porém esse resultado obtido por essa simulação não levou em conta possíveis mudanças nos parâmetros da fibra óptica, pois foram utilizados os valores sublinhados da tabela 3.1.

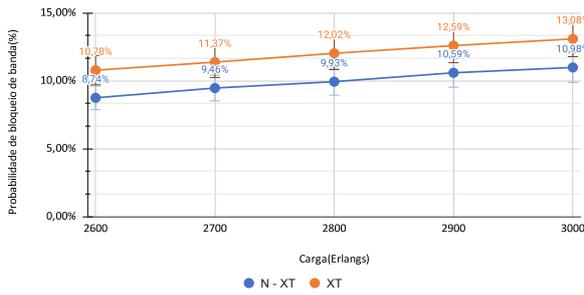
Layout	Média do Desvio Padrão (XT)	Média de bloqueio por núcleo (XT) - (N-XT)	Margem de Erro
Hexagonal	0,48%	0,15%	0,06898
Circular	0,41%	0,00%	0,05286

Tabela 4.2: Bloqueio de circuito, hexagonal e circular

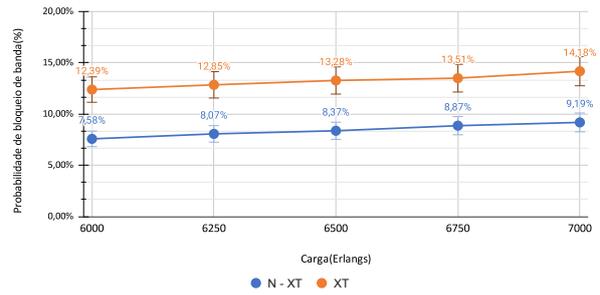
A tabela de resultados das simulações para as fibras de 12 núcleos circular e hexagonal apresenta valores próximos para o resultado de desvio padrão e para a margem de erro. Ambas as fibras apresentam um desvio padrão médio abaixo de 1% para todas simulações realizadas e margem de erro entre 0,05286 a 0,06898. A contribuição de cada núcleo das fibras foi próxima, considerando a simulação realizada sob a condição de diafonia. Além disso, a tabela apresenta a fibra circular como a de menor contribuição por núcleo para o bloqueio de um circuito.

4.4 Probabilidade de Bloqueio de Banda

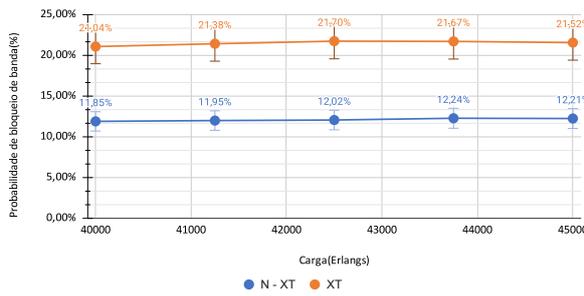
A Figura 4.4 apresenta os resultados de probabilidade de bloqueio de banda para o mesmo cenário da Figura 4.2.



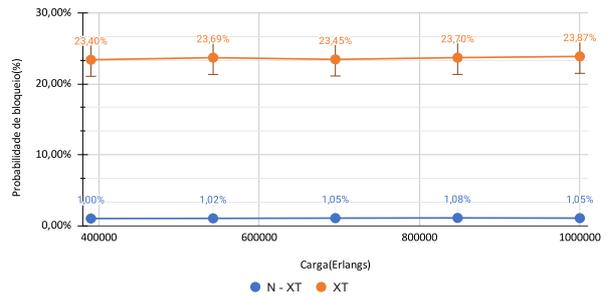
(a) Fibra de 7 núcleos



(b) Fibra de 13 núcleos



(c) Fibra de 19 núcleos



(d) Fibra de 37 núcleos

Figura 4.4: Probabilidade de bloqueio de banda

Os resultados mostram um desempenho similar para a probabilidade de bloqueio de banda quando comparado com a antecessora probabilidade de bloqueio de circuito. Entretanto, para a fibra de 13 núcleos, existe um maior impacto para a diafonia, comparado com o circuito da probabilidade de bloqueio na Figura 4.2b. A diferença no valor do bloqueio de banda para a diafonia foi o dobro do valor do bloqueio de circuito. Isso exemplifica como o valor desse bloqueio é mais influenciado para o bloqueio de banda quando são considerados mais núcleos na fibra ótica e também a sua variação dependendo do comportamento do algoritmo a cada momento que é executado.

Os outros casos para os números de núcleos seguem o mesmo comportamento do cenário anterior analisado, com um vão maior para o cenário sem diafonia comparado ao cenário com diafonia, de acordo com o aumento de núcleos da fibra ótica. A distância entre os núcleos e o coeficiente de acoplamento são os mesmos. Então, para um maior número de vizinhos, maior a probabilidade de bloqueio de banda.

Os valores obtidos com a probabilidade de bloqueio de banda foram maiores do que o valor obtido apenas com o bloqueio de circuito. Tal fato ocorreu pelo motivo de haver requisições de conexão com altos valores de banda com uma média de velocidade de requisição de 85 Gbps. De acordo com os resultados obtidos pela simulação e a partir da Figura 4.4, foram obtidos os seguintes resultados dos erros e da contribuição, verificados nas fibras hexagonais.

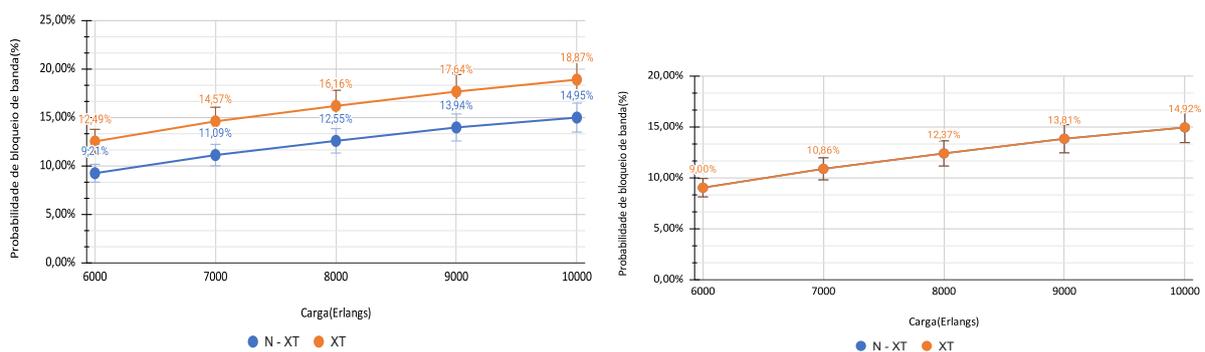
Número de núcleos	Média do Desvio Padrão (XT)	Média de bloqueio por núcleo (XT) - (N-XT)	Margem de Erro
7	0,60%	0,29%	0,10491
13	0,59%	0,37%	0,11607
19	0,77%	0,50%	0,18812
37	0,98%	0,61%	0,20704

Tabela 4.3: Tabela do bloqueio de banda

A partir Tabela 4.3, é analisado um comportamento de redução em comparação a análise da variação de valores encontrados na tabela anterior de bloqueio de circuito 4.1. Os valores obtidos com o desvio padrão foram menores para fibras com grande quantidade de núcleos, como por exemplo a fibra de 19 núcleos e a de 37 núcleos. O valor do desvio padrão dos resultados não chegou a atingir o valor de 1%. A margem de erro aumentou de valor, apesar da redução do desvio padrão e isso se deve ao fato de haver muitos valores próximos entre si porém mais dispersos, aumentando essa margem de erro.

Ao analisar a contribuição do bloqueio por cada núcleo de fibra, leva a vantagem a fibra que apresenta maior quantidade de núcleos. No caso, a fibra de 7 núcleos seria a fibra ideal, por apresentar a menor influência da XT e o menor impacto por núcleo.

4.5 Análise de layout das fibras para probabilidade de bloqueio de banda



(a) Fibra de 12 núcleos hexagonal

(b) Fibra de 12 núcleos Circular

Figura 4.5: Probabilidade de bloqueio de banda em fibras de 12 núcleos

A análise de geometria feita para a probabilidade de bloqueio de banda em uma fibra de doze núcleos apresenta uma melhora de desempenho. O mesmo comportamento é verificado para a avaliação da Figura 4.3, mas, agora, com o aumento na taxa da

probabilidade de bloqueio pela heterogeneidade gerada pela largura de banda. Além disso, tanto para o cenário com diafonia como para o cenário sem diafonia, ocorre o mesmo comportamento encontrado na análise anterior, feita sobre a probabilidade de bloqueio de circuitos.

A fibra com a geometria hexagonal tem aproximadamente o mesmo comportamento comparado com o cenário de probabilidade de bloqueio de circuito, porém com o aumento na taxa de probabilidade de bloqueio de banda, quando as interferências físicas são consideradas. O valor absoluto da probabilidade de bloqueio também aumenta para a avaliação de bloqueio de banda pelos tipos distintos de banda gerada.

Considerando o cenário de bloqueio de banda para os layouts de fibras apresentados no formato circular e para o formato hexagonal, é possível obter um comportamento novo comparado com a tabela do bloqueio de banda 4.3, com a seguinte tabela 4.4.

Layout	Média do Desvio Padrão (XT)	Média de bloqueio por núcleo (XT) - (N-XT)	Margem de Erro
Hexagonal	0,71%	0,30%	0,13977
Circular	0,57%	0,00%	0,10688

Tabela 4.4: Bloqueio de Banda, Hexagonal e Circular

Os resultados obtidos com o bloqueio de banda foram piores do que os resultados observados com o bloqueio do circuito, comportamento não observado com o desvio padrão para o bloqueio de banda em relação ao bloqueio de circuito, conforme observado ao comparar as tabelas 4.3 e 4.1. A margem de erro aumentou de valor em comparação aos valores anteriores, como também foi observado no bloqueio de banda na Figura 4.3.

A contribuição de bloqueio por núcleo também está favorável para a fibra circular com a permanência do valor de 0%, enquanto que a fibra hexagonal aumentou seu valor para 0,30%. Por esse motivo a fibra de arranjo circular, tanto para o caso de probabilidade de bloqueio de banda quanto de circuito, seria a escolhida entre essas duas, tendo em vista que não foi considerada a alteração de parâmetros causada pela mudança de geometria da fibra e também por todas as simulações utilizarem os valores sublinhados da tabela 3.1, os quais representam os parâmetros mais comuns para MCF .

4.6 Análise da Diafonia por núcleo de fibra

Os valores obtidos pela análise de desempenho nessas simulações, quando comparados com o objetivo de observar a influência da diafonia na probabilidade de bloqueio e na probabilidade de bloqueio de banda, foram usados para realizar uma análise de custo por

núcleo de fibra. Esta análise é uma avaliação para a média da probabilidade de bloqueio do circuito para cada tipo de fibra, pela subtração do resultado sem diafonia para o cenário com diafonia, com a tentativa de obter a influência da diafonia pela probabilidade de bloqueio por núcleo da fibra. A tabela 4.5 apresenta os valores de probabilidade de bloqueio causados pela diafonia por cada núcleo e por cada tipo de fibra:

Número de núcleos	Geometria	(XT) - (N-XT) Probabilidade de bloqueio	Média de impacto por núcleo
7	Hexagonal	0,89%	0,13%
12	Hexagonal	1,80%	0,15%
12	Circular	0,00%	0,00%
13	Hexagonal	2,79%	0,21%
19	Hexagonal	8,41%	0,44%
37	Hexagonal	18,44%	0,50%

Tabela 4.5: Análise de bloqueio por núcleo de fibra

Esta tabela mostra um valor pertinente para a última coluna, na qual se resume um custo efetivo por núcleo por tipo de fibra. Se considerarmos somente o número de núcleos e a probabilidade de bloqueio por núcleo a fibra de 12 núcleos circular seria a melhor escolha. Entretanto, para a fibra de 12 núcleos circular obter o desempenho verificado nos dois tipos de simulações avaliadas, foram utilizados os mesmos parâmetros para o restantes das fibras hexagonais. Porém, quando é modificada a geometria de uma fibra hexagonal para uma circular, é observado um aumento na aproximação de seus núcleos e uma modificação nos parâmetros utilizados nas fibras, como apresentado nas Figuras 4.3b e na 4.3a, o que afeta diretamente a distância dos núcleos e também o coeficiente de acoplamento. Essa mudança de parâmetros pela geometria não foi analisada pelo estudo, a fim de normalizar as fibras para serem efetuados os testes.

Provavelmente, uma fibra de 12 núcleos circular teria uma taxa de probabilidade de bloqueio maior do que uma hexagonal justamente pelo motivo de sacrificar o espaço para reduzir o número de vizinhos assim como apresentado no artigo [36].

Se for considerada a mudança de parâmetro causada pela geometria da fibra, possivelmente, a melhor fibra seria a de 7 núcleos hexagonal por apresentar o menor valor de influência da diafonia na probabilidade de bloqueio por cada núcleo da fibra, com o valor de 0,13%. Quando os valores são maiores na probabilidade de bloqueio, o número de núcleos na diafonia se torna ainda maior para a contribuição da diafonia por cada núcleo de fibra em todos os valores calculados.

Caso seja, avaliados os resultados das tabelas obtidas pelas análises de variação de valores, como as tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, os valores calculados também consideram a

avaliação do XT em cada cenário distinto e confirmaram o mesmo comportamento obtido por essa análise final do trabalho.

Como as velocidades utilizadas para o desempenho foram variáveis com uma média de 85 Gbps por circuito, o bloqueio de banda foi maior do que o apresentado apenas pela avaliação do bloqueio do circuito, com a possibilidade de ter valores maiores caso seja vislumbrado um cenário distinto. Para isso, foi considerado apenas o valor referente ao bloqueio de circuito, não levando em conta os cenários distintos de bloqueio de banda possíveis. Para esse cenário genérico, a fibra de 12 núcleos circular foi a de melhor desempenho.

Capítulo 5

Conclusão e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusão

O aumento de demandas por altas taxas de velocidade, causado pelas tecnologias inovadoras baseadas em páginas web, aplicativos e serviços pela internet, resulta em maior necessidade de banda passante. A pesquisa acerca da SDM-EON, bem como a fabricação da fibra e do hardware são formas de melhorar a disponibilidade desses recursos.

Neste trabalho, avaliações de diafonia foram apresentadas considerando diferentes tipos de fibra. Ademais, as avaliações de probabilidade de bloqueio de circuito e de probabilidade de bloqueio de banda foram utilizadas para analisar quais tipos de fibras são mais afetadas pela diafonia, considerando as fibras com diferentes números de núcleos e geometrias.

Além disso, também foi apresentado o aumento na probabilidade de bloqueio por núcleo associado ao aumento da quantidade de núcleos dentro da fibra. Avalia-se o custo de desempenho por cada quantidade de núcleos adicionados em cada fibra óptica. Então, conclui-se que, pelos resultados obtidos pela probabilidade de bloqueio de circuito, a fibra óptica de 7 núcleos hexagonal e a fibra de 12 núcleos circular tiveram o melhor desempenho. Essas fibras apresentaram a menor contribuição de diafonia por núcleo.

5.2 Trabalhos Futuros

A pesquisa realizada neste trabalho considerou a quantidade de núcleos para apenas dois layouts possíveis, o hexagonal e o circular. Entretanto, é possível realizar simulações com mais formas geométricas distintas de fibras ópticas e com alterações de parâmetros para se aproximar da realidade de cada fibra óptica estudada.

Além de poder alterar os parâmetros para cada tipo de fibra óptica, poderá ser realizada a inserção de diferentes componentes na fibra, com o objetivo de reduzir o efeito das

interferências entre os núcleos. Como visto, nas três formas de fibras ópticas apresentadas na figura 2.9, é possível avaliar sobre qual estrutura de fibra óptica pode-se obter a melhor redução para a interferência. Também, poderá ser analisada a eficiência da transmissão com o uso de tipos de núcleos distintos, como uma combinação de núcleos SMF com MMF, e as formas de implementação da fibra multi-modo com núcleos em degraus e núcleos graduados.

Referências

- [1] Patricia Layec, Arnaud Dupas, Dominique Verchère Kevin Sparks Sébastien Bigo: *Will metro networks be the playground for (true) elastic optical networks?* Journal of Lightwave Technology, 35:1260–1266, 2017. 1
- [2] Thomas Barnett Jr, Shruti Jain, Usha Andra Taru Khurana: *Cisco visual networking index (vni). complete forecast update, 2017–2022.* https://www.cisco.com/c/dam/m/en_us/network-intelligence/service-provider/digital-transformation/knowledge-network-webinars/pdfs/1213-business-services-ckn.pdf, 2018. 1
- [3] Brasileiro, Lucas Costa, André Drummond Ítalo: *A survey on challenges of spatial division multiplexing enabled elastic optical networks.* Optical Switching and Networking, 38, 2020. 4, 8, 16
- [4] Gangxiang Shen, Ya Zhang, Xu Zhou Yang Sheng Ning Deng Yiran Ma Andrew Lord: *Ultra-dense wavelength switched network: A special eon paradigm for metro optical networks.* IEEE Communications Magazine, 56:185–195, 2018. 5
- [5] Sung H. Baek, Won B. Roh Department: *Single-mode raman fiber laser based on a multimode fiber.* Optics Letters, 29, 2004. 9
- [6] X UEQIN X IE, J IAJING T U, X IAN Z HOU K EPING L ONG K UNIMASA S AITOH: *Design and optimization of 32-core rod/trench assisted square-lattice structured single- mode multi-core fiber.* 10
- [7] Dijkstra, Edsger W: *A note on two problems in connexion with graphs.* 1959. 12
- [8] Liu, Huiping, Cheqing Jin, Bin Yang e Aoying Zhou: *Finding top-k shortest paths with diversity.* IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 30(3):488–502, 2018, ISSN 10414347. 12
- [9] Ruijie Zhu, Yongli Zhao, Hui Yang Haoran Chen Jie Zhang and Jason P. Jue: *Crosstalk-aware rcsa for spatial division multiplexing enabled elastic optical networks with multi-core fibers.* Chinese Optics Letters, 14:100604–100608, 2016. 13
- [10] Jun Sakaguchi, Yoshinari Awaji, Naoya Wada Atsushi Kanno Tetsuya Kawanishi Tetsuya Hayashi Toshiki Taru Tetsuya Kobayashi Masayuki Watanabe: *109-tb/s (7x97x172-gb/s sdm/wdm/pdm) qpsk transmission through 16.8-km homogeneous multi-core fiber.* Optics InfoBase Conference Papers, páginas 16–18, 2011. 13
- [11] D. J. Richardson, J. M. Fini, L. E. Nelson: *Space-division multiplexing in optical fibres.* Nature Photonics, 7:354–362, 2013. 13

- [12] Alexandre Fontinele, Iallen Santos, Juarez Nolêto Neto Divanilson R. Campelo: *An efficient ia-rmlsa algorithm for transparent elastic optical networks*. Computer Networks, 118:1–14, 2017. 13
- [13] *Extremely low material loss and dispersion flattened topas based circular porous fiber for long distance terahertz wave transmission*. Optical Fiber Technology, 34:6–11, 2017. 15
- [14] Tomoya Yoshida, Emiko Omoda, Yuki Atsumi Takashi Nishi Syougo Tajima Noboru Miura Masahiko Mori Youichi Sakakibara: *Vertically curved si waveguide coupler with low loss and flat wavelength window*. Journal of Lightwave Technology, 2016. 15
- [15] SANYAM SHUKLA, RAM NARAYAN YADAV: *Regularized weighted circular complex-valued extreme learning machine for imbalanced learning*. IEEE Access, 3:3048–3057, 2015. 15
- [16] Dharmaweera, Madushanka Nishan, Li Yan, Magnus Karlsson e Erik Agrell: *Nonlinear-impairments- and crosstalk-aware resource allocation schemes for multicore-fiber-based flexgrid networks*. European Conference on Optical Communication, ECOC, páginas 1223–1225, 2016. 15
- [17] Ohashi, A., G. Borges, R. Rodrigues, A. Fernandes e J. Costa: *Impact of Cable Non-uniformities on the Performance of Copper Fronthaul Exploiting the Phantom Mode Transmission*. páginas 783–787, 2017. 16
- [18] Yao, Weiming, Giovanni Gilardi, Meint K. Smit e Michael J. Wale: *Performance degradation of integrated optical modulators due to electrical crosstalk*. Journal of Lightwave Technology, 34(13):3080–3086, 2016, ISSN 07338724. 17
- [19] Lai, Y.: *Evolution of Wireline Transceiver Standards*. Imid 2009, páginas 1069–1072, 2009. 17
- [20] de Azevedo Gomes, Diego, Aldebaro Klautau e Evaldo Pelaes: *Modelling and performance evaluation of alien crosstalk mitigation in DMT transmissions*. Digital Signal Processing: A Review Journal, 89:91–103, 2019, ISSN 10512004. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2019.03.010>. 17
- [21] Masanori Koshihara, Kunimasa Saitoh, Katsuhiro Takenaga Shoichiro Matsuo: *Multicore fiber design and analysis: coupled-mode theory and coupled-power theory*. Optics InfoBase Conference Papers, 19:102–111, 2011. 18
- [22] Macho, Andres, Maria Morant e Roberto Llorente: *Unified model of linear and nonlinear crosstalk in multi-core fiber*. Journal of Lightwave Technology, 34(13):3035–3046, 2016, ISSN 07338724. 18
- [23] Tetsuya Hayashi, Toshiki Taru, Osamu Shimakawa Takashi Sasaki Eisuke Sasaoka: *Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber: erratum*. Optics Express, 27:12517, 2019. 18

- [24] Klinkowski, Mirosław, Lechowicz Piotr Walkowiak Krzysztof: *A study on the impact of inter-core crosstalk on sdm network performance*. 2018 International Conference on Computing, Networking and Communications, ICNC 2018, páginas 404–408, 2018. 20
- [25] Lei, Yu, Chen Bowen Gao Mingyi Xiang Lian Zhang Qianwu: *Dynamic routing, core, and spectrum assignment with minimized crosstalk in spatial division multiplexing elastic optical networks*. Asia Communications and Photonics Conference, ACP, 2018-Octob:1–3, 2018. 20
- [26] Oliveira, Helder M.N.S. Da Fonseca, Nelson L.S.: *Sharing spectrum and straddling p-cycle fipp for protection against two simultaneous failures in sdm elastic optical networks*. 2017 IEEE 9th Latin-American Conference on Communications, LATINCOM 2017, 2017-Janua:1–6, 2017. 20
- [27] Yang, Mingcong, Zhang Yongbing Wu Qian: *Routing, spectrum, and core assignment in sdm-eons with mcf: Node-arc ilp/milp methods and an efficient xt-aware heuristic algorithm*. Journal of Optical Communications and Networking, páginas 195–208, 2018. 20
- [28] Walkowiak, Krzysztof Wlodarczyk, Adam Klinkowski Mirosław. *IEEE International Conference on Communications*, 2019-May:1–7, 2019. 20
- [29] Lobato, Fabricio R.L., Jacob Antonio Rodrigues Jhonatan Cartaxo Adolfo V.T. Costa J. C.W.A.: *Inter-core crosstalk aware greedy algorithm for spectrum and core assignment in space division multiplexed elastic optical networks*. Optical Switching and Networking, 33:61–73, 2019. 20
- [30] Yuan, Hui, Furdek Marija Muhammad Ajmal Saljoghei Arsalan Wosinska Lena. *Journal of Optical Communications and Networking*, 10:272–288, 2018. 20
- [31] Costa, Lucas R., Léia S. de Sousa, Felipe R. de Oliveira, Kaio A. da Silva, Paulo J. S. Júnior e André C. Drummond: *ONS: Simulador de Eventos Discretos para Redes Ópticas WDM/EON*. Em *SBRC 2016 - Salao de Ferramentas*, may 2016. http://sbrc2016.ufba.br/downloads/Salao_Ferramentas/154765.pdf. 22, 23
- [32] A. DONKO, M. BERESNA, Y. JUNG J. HAYES D. J. RICHARDSON G. BRAMBILLA: *Point-by-point femtosecond laser micro-processing of independent core-specific fiber bragg gratings in a multi-core fiber*. Optics Express, 26:2039, 2018. 25
- [33] *Heterogeneous all-solid multicore fiber based multipath michelson interferometer for high temperature sensing*. Optics Express, 24:20210, 2016. 25
- [34] *Multicore optical fiber grating arrays for sensing applications*. European Conference on Optical Communication, ECOC, 35:461–463, 2016. 25
- [35] Yoshinari Awaji, Jun Sakaguchi, Benjamin J. Puttnam Ruben S. Luís Jose Manuel Delgado Mendiñeta Werner Klaus Naoya Wada: *High-capacity transmission over multi-core fibers*. Optical Fiber Technology, 35:100–107, 2017. 25

- [36] Dablu Kumar, Rakesh Ranjan: *Crosstalk analysis in homogeneous 12-core multicore fiber with different core layouts for lp01 and lp02 modes*. IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON, 2017-Decem:2405–2408, 2017. 26, 31
- [37] Ahmed Samir, Bostjan Batagelj: *Stack-and-draw manufacture process of a seven-core optical fiber for fluorescence measurements*. Fiber and Integrated Optics, 37:1–11, 2018. 26