



UNILAB

UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA

AFRO-BRASILEIRA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS

AMANDA SOUZA DA SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS DE MELHORAMENTO DE CONSUMO
DE ENERGIA EM REDE ÓPTICA ELÁSTICA POR MEIO DE SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL**

FORTALEZA

2020

AMANDA SOUZA DA SILVA

ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS DE MELHORAMENTO DE CONSUMO DE
ENERGIA EM REDE ÓPTICA ELÁSTICA POR MEIO DE SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energias da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Energias.

Orientador: Prof. Dr. Sabi Yari Moïse Bandiri

FORTALEZA

2020

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Silva, Amanda Souza da.

S586a

Análise comparativa das técnicas de melhoramento de consumo de energia em rede óptica elástica por meio de simulação computacional / Amanda Souza da Silva. - Redenção, 2020.
46f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Sabi Yari Moïse Bandiri.

1. Modulação (Eletrônica). 2. Consumo de energia. 3. Análise elástica (Engenharia). 4. Energia elétrica - Consumo. I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 621.31

AMANDA SOUZA DA SILVA

ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS DE MELHORAMENTO DE CONSUMO DE
ENERGIA EM REDE ÓPTICA ELÁSTICA POR MEIO DE SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Energias
da Universidade da Integração Internacional
da Lusofonia Afro-brasileira, como requisito
parcial à obtenção do grau de bacharel em
Engenharia de Energias.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Sabi Yari Moïse Bandiri (Orientador)
Universidade da Integração Internacional da
Lusofonia Afro-brasileira (UNILAB)



Prof. Dr. Carlos Alberto Cáceres Coaquira
Universidade da Integração Internacional da
Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Profa. Dra. Lúcia Maria Carvalho Sousa Cordeiro
Universidade da Integração Internacional da
Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

À família de sangue e de coração, por sua capacidade de acreditar e investir em mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço e dedico este trabalho às seguintes pessoas:

Deus, por ter me dado ânimo, me iluminado e guiado durante toda a trajetória na Unilab.

Aos meus pais, Eliene Pereira e Nunes da Silva, por serem rocha e porto seguro.

As minha irmãs, Alessandra Damascena e Milena Souza, por ser muitas vezes guia do meu caminho e também ao meu irmão Alex Souza, por terem me ensinarem a importância da dedicação em todos os âmbitos da vida.

Ao meu noivo, amigo e companheiro de curso pelos estudos na madrugada, pela mão dada, pela lágrima enxugada durante os momentos difíceis e principalmente por não desistir e finalizar esse caminho junto comigo.

Aos meus amigos que são família, pela compreensão da ausência, pela saudade compartilhada, pela força dada e principalmente por continuarem do meu lado nessa caminhada.

As minhas primas, Sâmia e Érika e minha tia Fátima por um dia terem acreditado, incentivado e me ajudado a chegar aqui.

Aos meus colegas de curso pelas inúmeras horas de discussão e estudos compartilhados.

A Unilab pelo espaço e oportunidade oferecida.

Ao corpo docente do curso de engenharia de energias da Unilab, por terem me permitido aprender junto a vocês.

A professora Rejane Félix por ter acreditado em mim, me permitido expandir os conhecimentos e participar de um projeto de pesquisa.

E ao meu orientador, Sabi Bandiri pela paciência, pelo apoio, por acreditar, pelas correções e pela ótima orientação.

"Uma mente que se abre para uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original."

(Albert Einstein)

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma análise teórica de diferentes técnicas que podem ser aplicadas nas redes ópticas de futura geração (redes ópticas elásticas), com o intuito de diminuir o consumo de energia e conseqüentemente melhorar a eficiência energética. Tal análise é feita a princípio a partir do embasamento em outros estudos desenvolvidos, afim de comprovar a eficiência energética das redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Network* - EON) que possuem característica adaptativa, em relação a rede tradicional que possui como características grades fixas para atendimento da demanda e atualmente se mostra defasada, pois o atendimento a demanda real a partir da grade fixa por vezes é ineficiente gerando um aumento ou gasto desnecessário de energia para transmissão da informação. Posteriormente é realizado durante o trabalho um estudo comparativo mais específico do comportamento de consumo de energia nas transmissões de informação nas redes ópticas, a partir da aplicação de algumas técnicas e algoritmos encontrados na literatura onde é realizada simulações computacionais, que foram possibilitadas a partir da utilização de alguns parâmetros, explanados durante este trabalho. Tais simulações feitas usando a Topologia da Rede Pan-European COST 239 demonstram o comportamento individual de consumo das redes ao utilizarem-se dos algoritmos frente a diversos cenários em relação aos pedidos de conexão. Ao fim, foi possível analisar e concluir a eficiência do algoritmo que usa técnicas de alocação de espectro de forma adaptativa em relação aqueles que adotam algoritmos em que os parâmetros são fixos e compreender a importante de se desenvolver a rede óptica elástica para atender a demanda crescente dos usuários em diversos tipos amenizando ao mesmo tempo os gastos energéticos.

Palavras-chave: Modulação Adaptativa. Redes ópticas elásticas. Consumo de energia. Eficiência energética.

ABSTRACT

This work presents a theoretical analysis of different techniques that can be applied in future generation optical networks (elastic optical networks), in order to reduce energy consumption and consequently improve energy efficiency. This analysis is based on other studies developed in order to prove the efficiency of elastic optical networks (EON) in relation to the traditional fixed grid network, which currently shows a lag, since the increase in user demands generates a significant increase in energy consumption and expresses a real need for efficiency in this sector. Later, a more specific comparative study of the behavior in terms of energy consumption of some algorithms found in the literature is carried out during this work, based on computer simulations, which were made possible by the use of some parameters explained during this work. Such simulations made using the Pan-European COST 239 Network Topology demonstrate the consumption behavior of the algorithms individually against several scenarios in relation to connection requests. In the end, it was possible to analyze and conclude the efficiency of the algorithm that uses techniques of spectrum allocation in an adaptive way in relation to those that adopt algorithms in which the parameters are fixed and to understand the importance of developing the elastic optical network to meet the growing demand of users in several types while at the same time alleviating energy expenditures.

Keywords: Adaptive Modulation. Elastic optical networks. Energy consumption. Energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama para um sistema básico de comunicação.	14
Figura 2 – Diagrama representativo de um sistema de transmissão por fibra óptica. . .	14
Figura 3 – Cabo multimodo (superior) e cabo monomodo (inferior).	16
Figura 4 – Diâmetros dos cabos ópticos usuais.	17
Figura 5 – Ângulo incidência.	18
Figura 6 – Alvo gerado.	19
Figura 7 – Direcionamento da luz.	19
Figura 8 – Índice de refração degrau.	20
Figura 9 – Índice de refração gradual.	21
Figura 10 – Representação da atuação de cinco subportadoras	22
Figura 11 – Demonstração do intervalo de guarda.	24
Figura 12 – Demonstração do sinal OFDM + prefixo cíclico.	24
Figura 13 – (a)Representação de grades fixas. (b) Representação das gradex flexíveis da Rede EON.	25
Figura 14 – Topologia da rede Pan-European COST 239.	35
Figura 15 – Primeira possibilidade de conexão London - Conpenhagen.	36
Figura 16 – Segunda possibilidade de conexão London - Conpenhagen.	36
Figura 17 – Terceira possibilidade de conexão London - Conpenhagen.	36
Figura 18 – Fluxograma do Algoritmo para determinar modulação.	38
Figura 19 – Simulação dos algoritmos SP, MH e AMm para 1 caminho.	39
Figura 20 – Simulação dos algoritmos SP, MH e AMm para 3 caminhos.	40
Figura 21 – Simulação dos algoritmos SP, MH e AMm para 5 caminhos.	40
Figura 22 – Demonstração dos resultados de consumo de energia por conexão.	41
Figura 23 – Comportamentos dos algoritmos para 3000 conexões com 3 e 5 caminhos. .	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM-EE	Modulação adaptativa para o algoritmo de eficiência energética
AMC	Modulação Adaptativa e Codificação
AMm-RSA	Modulação adaptativa modificado de atribuição de espectro
BVTs	<i>Transponders</i> de largura de banda variável
DAM	modulação adaptativa à distância
dB	decibel
EON	<i>Elastic Optical Network</i>
EONs	<i>Elastics Opticals Networks</i>
F.O	Fibras ópticas
FDM	Multiplexação por Divisão de Frequência
FEC	Correção de erro antecipado
FWM	Four Wave Mixing
ISI	Interferências entre Portadoras
ITU	União Internacional das Telecomunicações
MH-RSA	Atribuição do caminho com menos saltos
OFDM	Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal
ONSR	Relação Sinal/Ruído Óptico
OXC	Comutador óptico
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
QAM	(Quadrature Amplitude Modulation)
SEC-RSA	Atribuição de espectro de roteamento mais curto
SP-RSA	Atribuição do caminho mais curto
SPM	<i>Self-Phase Modulation</i>
SRS	<i>Stimulated Raman Scattering</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WSS	<i>Wavelength-Selective Switches</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	Organização do trabalho	13
3	CONCEITOS BÁSICOS	14
3.1	Rede óptica	15
3.2	Tecnologias Utilizadas nas Redes Ópticas	16
3.2.1	<i>Cabos de fibra Multimodos</i>	17
3.2.2	<i>Cabos de fibra Monomodo</i>	18
3.3	Transmissão na Rede Óptica	18
3.4	Multiplexação por divisão de frequências ortogonais nas Redes Ópticas	22
3.5	Redes Ópticas Elásticas	23
3.5.1	<i>OFDM e as Redes Ópticas Elásticas</i>	26
4	TÉCNICAS DE ECONOMIA DE ENERGIA EM REDES ÓPTICAS . .	28
4.1	Algoritmo para redução do consumo de energia em redes WDM	28
4.2	Algoritmos aplicados em Redes ópticas elásticas	30
4.2.1	<i>Modulação Adaptativa</i>	30
4.2.2	<i>Outros algoritmos para busca da eficiência energética em EONs</i>	32
5	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMPARATIVA ENTRE ALGORITMOS FIXOS E ADAPTÁVEL	35
5.1	Resultados Obtidos	39
6	CONCLUSÕES	43
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

Métodos de comunicação à distância é um anseio pela espécie humana desde que os indicativos de estudiosos demonstraram esta possibilidade. No princípio do desenvolvimento deste ramo, as redes de transmissão eram realizadas com base em fios de cobre, porém tal formato de transmissão apresentava problemas como atenuação de sinal e ruídos durante a comunicação. Como consequência da busca pelo melhoramento de tais problemas, iniciou-se o desenvolvimento de redes ópticas, que inseriram no ramo da comunicação melhorias como: uma capacidade maior na transmissão e capacidade de não sofrer interferências eletromagnéticas (QUEIROZ; ASSIS, 2012).

Com o melhoramento das redes de comunicação e com o desenvolvimento das tecnologias disponíveis a população, há pelo menos duas décadas existe uma grande crescente do uso de dispositivos de tecnologia que necessitam de uma rede que possibilite uma boa comunicação e transferência de dados em tempo real. Essa realidade vem influenciando e instigando a necessidade de desenvolver uma forma de transmissão mais eficiente, tanto em qualidade quanto em energia, como é afirmado por (ZHAO *et al.*, 2017) "o número de assinantes da Internet e tipos de rede vem crescendo rapidamente, produzindo uma quantidade não negligenciável de consumo de energia. E essa quantidade de consumo de energia cresce aproximadamente 12% a cada ano devido ao aumento da expansão da rede".

Portanto, visando a eficiência energética na transmissão de dados, as redes ópticas elásticas são motivo de grandes estudos e pesquisas já que a principal característica desenvolvida nesse modelo de rede é a eficientização na transmissão de dados. Outro ponto de grande interesse relacionado a essas redes, é que elas se apresentam como solução para problemáticas apresentadas em outros modelos de transmissão de dados, como por exemplo, a Multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing* (WDM)) utilizada atualmente, que, no início do desenvolvimento de redes de transmissão apresentou-se como solução inovadora, pois tem a capacidade de enviar simultaneamente vários comprimentos de onda em uma mesma fibra (TRONCO; AVILA, 2007) e (BRANDAO, 2010). Apesar de tal característica, esse tipo de tecnologia acaba por apresentar diversas limitações tal como largura de banda fixa (50 GHz segundo ITU) (MOURA *et al.*, 2015), que é por vezes limitar a capacidade das redes quando grande volume de carga deve ser trafegada. Enquanto temos como características nas rede ópticas elásticas (*Elastic Optical Network* (EON)) alocação de largura de banda variável e formato de modulação adaptativo (PEREIRA *et al.*, 2013), que são muito atraentes, pois possibilitam o

atendimento com eficiência as crescentes demandas por transmissão de informação, em contraste com a rede convencional, de grade fixa e largura de banda rígida (WDM).

Por existir um espaço que possa ser eficientizado no momento da transmissão de informação, foi introduzido o formato de modulação (Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal (OFDM)), que considera uma largura de banda elástica, que se adapta a necessidade da transmissão da informação, a qual se refere as redes ópticas elásticas. "Diferente de outros sistemas de comunicação que utilizam uma única portadora para transmitir a informação (por exemplo, rádios AM e FM), o sistema OFDM utiliza um número grande de subportadoras (N) ortogonais, geralmente equi-espaçadas na frequência para modular e enviar o sinal ao receptor."(FUKUDA, 2016)

Tal formato de modulação foi o que permitiu o desenvolvimento primário das redes *Elastic Optical Networks* (EONs) (FONTINELE, 2017), tornando-a uma área que atualmente se encontra em grande desenvolvimento e que possivelmente permitirá que ocorra economia de energia durante a comunicação das tecnologias de informação e incentivou esse estudo.

2 OBJETIVOS

A realização deste trabalho divide-se em dois objetivos, sendo o primeiro o de realizar a abordagem teórica de algumas técnicas de modulação que podem ser utilizadas nas redes ópticas wdm e redes ópticas elásticas, afim de diminuir o seu consumo de energia para atender as demandas de comunicação de forma dinâmica, e o segundo consiste em realizar uma análise comparativa de atuação e eficiência energética da técnica de modulação adaptativa em relação as técnicas usuais de modulação fixa.

2.1 Organização do trabalho

Para a compreensão das valiosas contribuições que a transmissão de dados via redes ópticas trouxeram e posterior entendimento da área de estudo deste trabalho, é necessário entender a composição básica de qualquer sistema de comunicação.

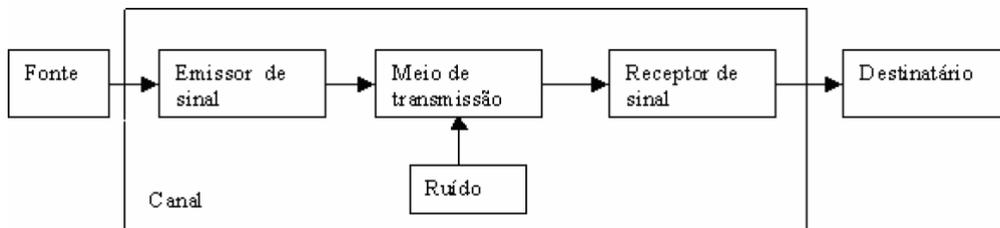
Desta maneira, este trabalho encontra-se dividido em 6 capítulos, onde o primeiro apresenta a motivação principal para o desenvolvimento deste estudo. Já no segundo capítulo é apresentado os objetivos e organização. No terceiro é exposto alguns conceitos básicos para melhor entendimento das EONs: funcionamento e características abordando o formato de modulação OFDM, a qual a rede óptica é baseada. É descrito no quarto capítulo alguns dos estudos já desenvolvidos anteriormente e suas contribuições que foram base para o desenvolvimento desta pesquisa. No quinto e sexto, finalmente é apresentado os estudos e suas conclusões, respectivamente, obtidos a partir deste estudo.

3 CONCEITOS BÁSICOS

Para melhor compreendermos a funcionalidade das redes ópticas, vamos iniciar a abordagem a partir da explicação da estrutura física de um sistema de comunicação. Apresentando as partes integrantes deste sistema temos a fonte, que trata do local de onde origina-se o sinal (geralmente um nó, para sistemas ópticos); o canal de transmissão, composto pelo emissor de sinal, o qual converte o sinal primário (voz, música, arquivos em geral) para sinais que permitam a transmissão para grandes distâncias e em quantidade de informações razoável e, por fim, o receptor/destinatário, como é demonstrado na Figura 1.

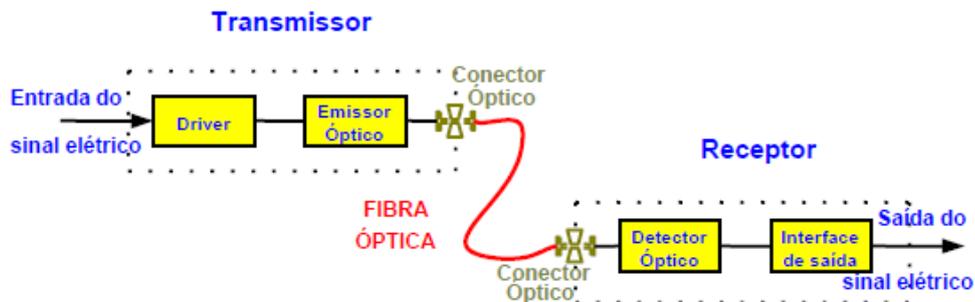
Conforme demonstrado por (TRONCO; AVILA, 2007), nos sistemas tradicionais de comunicação este sinal (enviado pela fonte) é um conjunto de pulsos elétricos que transportam consigo as informações. Podem ainda serem ondas eletromagnéticas com comprimento de ondas variadas, como exemplo temos as comunicações com sinais de rádio. Já nas redes ópticas (Figura 2), estes sinais são feixes de luz, o que justifica a alta velocidade de transmissão de dados nestes sistemas.

Figura 1 – Diagrama para um sistema básico de comunicação.



Fonte: (TRONCO;AVILA,2007)

Figura 2 – Diagrama representativo de um sistema de transmissão por fibra óptica.



Fonte: Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/igorsfilipe/comunicacoes-oticas-i-2>>. Acesso em 10 de abr 2020.

No extremo do canal de transmissão há o receptor, o qual recebe os sinais transmitidos e os convertem para o seu formato final usual, em geral o mesmo que entra no transmissor. Por fim, o destinatário é o objetivo final do transporte de informações, onde de fato terá a aplicabilidade da informação transportada.

Agora apresentando os componentes básicos de uma rede óptica (Figura 2) individualmente, temos:

- **Driver:** é um circuito eletrônico responsável pelo controle da polarização elétrica e da potência luminosa transmitida pelo dispositivo emissor.
- **Transmissor:** É formado por um dispositivo emissor de luz e um circuito eletrônico. Realiza a conversão eletro-óptica dos sinais.
- **Conector Óptico:** Responsável pela conexão do emissor óptico à Fibras ópticas (F.O), e da fibra óptica ao detector óptico.
- **Fibra óptica:** É o meio onde a potência luminosa, injetada pelo emissor de luz, é guiada e transmitida até o fotodetector.
- **Receptor:** Formado por um dispositivo fotodetector e um estágio de interface com a saída. O dispositivo fotodetector tem a função de detecção e conversão do sinal luminoso em sinal elétrico
- **Interface de saída:** é um circuito eletrônico que tem a função básica de filtrar e amplificar o sinal convertido.

É importante salientar que o sinal está sujeito a interferências (ruídos) durante o trajeto (dependendo da tecnologia utilizada, de forma mais ou menos severa), pois o ambiente tecnológico ao qual estamos inseridos atualmente está cercado por todos os lados de equipamentos, componentes, linhas de transmissão e distribuição, fenômenos e, até mesmo, trânsito de outros sinais que emitem ou são radiações eletromagnéticas que podem alterar ou corromper a informação.

3.1 Rede óptica

Redes ópticas são redes de comunicação de dados que utilizam cabos ópticos para transportar o sinal desejado, e apresentam ganhos significativos em eficiência se comparado aos sistemas de transmissão de vanguarda, sobretudo em relação às elevadas taxas e velocidades de transmissão, alto desempenho para grandes distâncias, degradação do sinal consideravelmente menor em relação às transmissões elétricas, uma vez que a transmissão se dá em forma de luz,

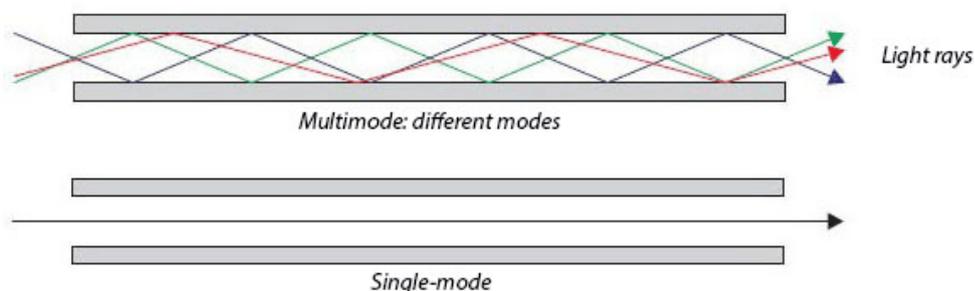
tornando-a imune às interferências eletromagnéticas e baixa atenuação do sinal (LOMONACO, 2006). Outro fator positivo somado à essa tecnologia é que não há condução de corrente elétrica, logo os problemas inerentes a esses sistemas, como diferença de potencial elétrico, quedas de tensão e problemas com raios não são observados nos meios ópticos.

O princípio fundamental para o funcionamento eficaz das fibras ópticas está embasado na reflexão total da luz, e para isso ser possível é imprescindível a luz partir de um meio mais denso para um meio menos denso, observando e mantendo o ângulo de incidência igualmente ou superior ao ângulo crítico. (QUEIROZ; ASSIS, 2012) A constituição de uma fibra óptica é basicamente de materiais dielétricos (geralmente sílica ou plástico) (KEISER, 2014). Na camada mais superficial há um revestimento externo, o qual trata-se de uma capa que recobre toda a fibra óptica. Na camada seguinte temos as fibras de resistência mecânica, a qual é a principal proteção do núcleo contra impactos que provoquem danos físicos. Abaixo destas fibras encontra-se a capa feita de plástico, que envolve o núcleo e a casca, protegendo-os contra esforços mecânicos e excessos de curvaturas. Logo depois vem a casca revestindo o núcleo. Por fim, na camada mais interna e central da bitola encontra-se o núcleo. É o elemento mais importante da fibra e é feito de vidro ou plástico, sendo o responsável pela transmissão da luz.

3.2 Tecnologias Utilizadas nas Redes Ópticas

Os sinais luminosos são transmitidos através de cabos de fibra ópticas (Figura 3), destacando-se dois grupos: Fibra Multimodo e Fibra Monomodo.

Figura 3 – Cabo multimodo (superior) e cabo monomodo (inferior).

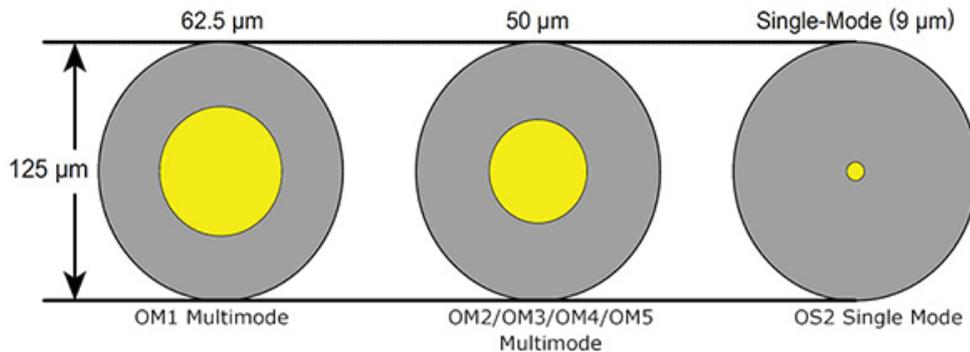


Fonte: Disponível em: <<https://www.blackbox.com.br>>. Acesso em: 10 de jun. 2020.

Estes dois tipos de cabos diferenciam-se basicamente pelo diâmetro do núcleo de condução do sinal (Figura 4), possuindo dimensões entre 50 micrômetros e 62,5 micrômetros para o modelo Multimodo, e cerca de 9 micrômetros para o cabo monomodo. Ambos possuem

um revestimento que totalizam uma bitola de 125 micrômetros.

Figura 4 – Diâmetros dos cabos ópticos usuais.



Fonte: Disponível em: <<https://www.blackbox.com.br>>. Acesso em: 10 de jun. 2020.

3.2.1 Cabos de fibra Multimodos

Embora possuam características físicas similares, e possam ser utilizados para as mesmas finalidades, as especificações de cada modelo determinam a sua aplicação ideal. Por exemplo, os cabos de 50 micrômetros, especificamente o modelos OM5, OM3 e OM4, permitem a conexão de comprimentos de onda maiores e maior taxa de velocidade, sendo recomendadas para aplicações locais como: *backbone* (espinha dorsal), conexões internas e horizontais. Como evidenciado na Figura 3, o sinal luminoso percorre o cabo debatendo-se por conta do espaçamento interno e do efeito de reflexão do revestimento interno do cabo, explicando o motivo do multimodo ter uma capacidade inferior de distâncias para a condução do sinal. E comporta a condução de múltiplos sinais luminosos, tanto sinais luminosos oriundo de *led's* quanto de laser, possuindo modelos otimizados para lasers, mas comumente utiliza-se LED, por conta do menor custo.

Tabela 1 – Parâmetros de desempenho de transmissão de cabo de fibra óptica Multimodo.

FIBRA MULTIMODO				
Tipos de cabo	Comprimento de onda	Atenuação máxima	Comprimento mínimo de transbordo de largura de banda modal	Comprimento mínimo efetivo de largura de banda modal
Fibra multimodo OM1 de 62,5 à 125 microns	850 - nm	3.5 dB/km	200 MHz-km	Não é necessário
	1300 - nm	1.5 dB/km	500 MHz-km	Não é necessário
Fibra multimodo OM2 de 50 à 125 microns	850 - nm	3.5 dB/km	500 MHz-km	Não é necessário
	1300 - nm	1.5 dB/km	500 MHz-km	Não é necessário
Fibra multimodo OM3 de 50 à 125 microns	850 - nm	3.0 dB/km	1500 MHz-km	2000 MHz-km
	1300 - nm	1.5 dB/km	500 MHz-km	Não é necessário
Fibra multimodo OM4 de 50 à 125 microns	850 - nm	3.0 dB/km	3500 MHz-km	4700 MHz-km
	1300 - nm	1.5 dB/km	500 MHz-km	Não é necessário
Fibra multimodo OM5 de 50 à 125 microns	850 - nm	3.0 dB/km	3500 MHz-km	4700 MHz-km
	956 -nm	2.3 dB/km	1850 MHz-km	2470 MHz-km
	1300 - nm	1.5 dB/km	500 MHz-km	Não é necessário

Fonte: Adaptado da referência: <<https://www.blackbox.com.br>>. Acesso em: 10 de jun. 2020.

3.2.2 Cabos de fibra Monomodo

Contrariamente ao cabo do tópico anterior, o de fibra monomodo conta apenas com um modo de propagação e único comprimento de luz no núcleo da fibra. Tal limitação possui suas vantagens, destacando-se a não ocorrência de sobreposição dos diferentes comprimentos de onda, anulando qualquer ocorrência de interferência observada nos cabos multimodos durante grandes trajetos, explicando assim a sua maior eficiência na transmissão de sinais para maiores distancias. O cabo de fibra monomodo conta com um núcleo de vidro (8 a 10 microns), orientando a luz no centro do núcleo, não ocorrendo os saltos nas bordas.

Tabela 2 – Parâmetros de desempenho de transmissão de cabo de fibra óptica Monomodo.

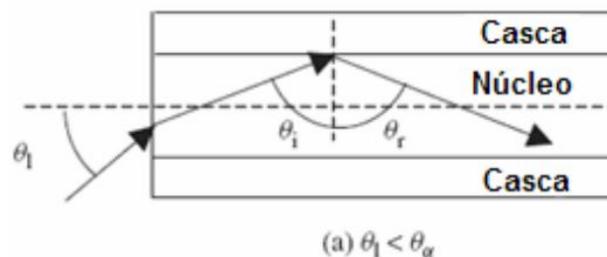
FIBRA MONOMODO				
Tipos de cabo	Comprimento de onda	Atenuação máxima	Comprimento mínimo de transbordo de largura de banda modal	Comprimento mínimo efetivo de largura de banda modal
Monomodo Interno-Externo	1310 - nm	0,5 dB/km	N/A	N/A
	1383 - nm	0,5 dB / km	N/A	N/A
	1550 - nm	0,5 dB / km	N/A	N/A
Monomodo Instalação Interna	1310 - nm	1,0 dB / km	N/A	N/A
	1383 - nm	1,0 dB / km	N/A	N/A
	1550 - nm	1,0 dB / km	N/A	N/A
Monomodo Instalação Interna	1310 - nm	0,4 dB/km	N/A	N/A
	1383 - nm	0,4 dB / km	N/A	N/A
	1550 - nm	0,4 dB / km	N/A	N/A

Fonte: Adaptado da referência: <<https://www.blackbox.com.br>>. Acesso em: 10 de jun. 2020.

3.3 Transmissão na Rede Óptica

Como já abordado, em uma transmissão por fibras ópticas a luz trafega a partir de um meio mais denso para um menos denso. Para lograr êxito, a luz deve atingir a interface entre o núcleo e a casca em um ângulo (θ_i) igual ou maior que o ângulo crítico (θ_c). Isso é possível quando a luz é lançada nas terminações da fibra em um ângulo (θ_1) menor que o ângulo crítico, conforme demonstrado na Figura 5.

Figura 5 – Ângulo incidência.

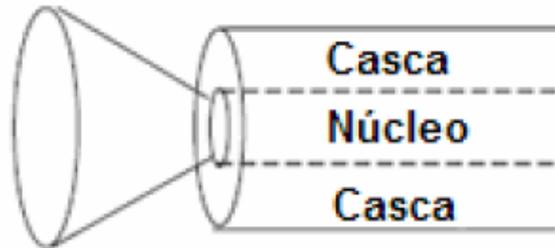


Fonte: (TRONCO;AVILA,2007)

A incidência da luz nessas características resulta em um cone de aceitação (Figura

6), apresentando-se como uma espécie de alvo para onde a luz deve ser lançada. Usualmente é utilizada uma lente focal para direcionar a luz em uma pequena área do núcleo (Figura 7).

Figura 6 – Alvo gerado.



Fonte: (TRONCO;AVILA,2007)

O ângulo de aceitação da fibra é dado pela expressão obtida a partir da lei de *Snell* nas condições de reflexão interna total (Eq.3.1):

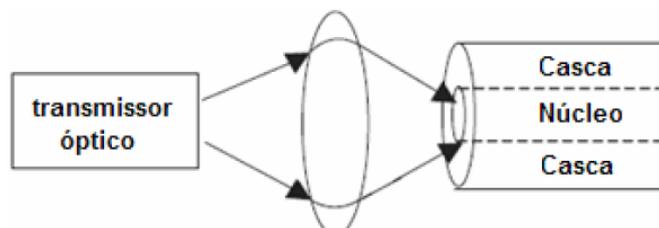
$$\theta_a = \text{sen}^{-1} \left[\frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \right] \quad (3.1)$$

Onde, n_0 é o índice de refração do meio onde a fibra óptica está imersa, n_1 é o índice de refração do meio 1 e n_2 é o índice de refração do meio 2. O ângulo de aceitação é uma grandeza essencial para definir outro importante parâmetro de uma fibra óptica: a abertura numérica (AN), demonstrada na Equação 3.2:

$$AN = n_0 \text{sen} \Theta_a = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (3.2)$$

A abertura numérica de uma fibra óptica é uma grandeza diretamente proporcional à sua capacidade de captar e transmitir luz e esta pode ser obtida ao se considerar as diferenças relativas dos índices de refração entre o núcleo e a fibra. Existem dois perfis para descrever

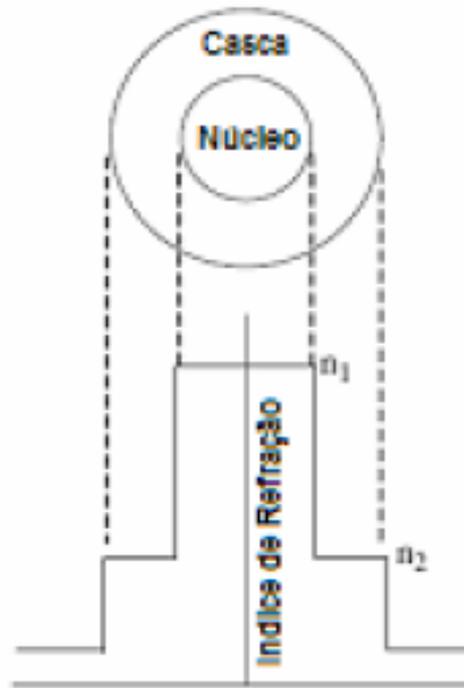
Figura 7 – Direcionamento da luz.



Fonte: (TRONCO;AVILA,2007)

os índices de refração para F.O: índice degrau e índice gradual. No perfil degrau o índice de refração do núcleo é constante em toda a seção transversal do núcleo (Figura 8).

Figura 8 – Índice de refração degrau.



Fonte: (TRONCO;AVILA,2007)

No perfil gradual o índice de refração do núcleo varia ao longo da seção transversal do mesmo com um comportamento parabólico (Figura 9).

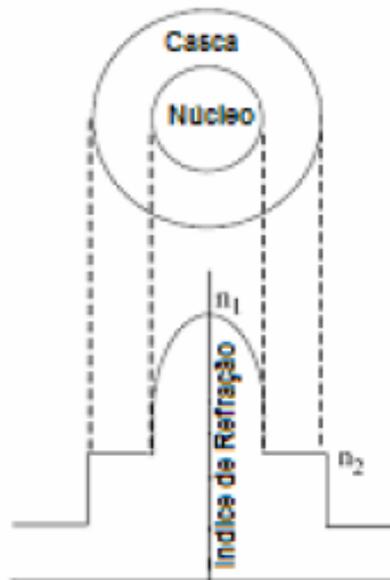
A transmissão da luz nas fibras ópticas está sujeita às perdas devido a efeitos ópticos. Estes efeitos podem ser lineares e não lineares. Os principais tipos de perdas relativas a efeitos lineares são: atenuação e dispersão.

Atenuação refere-se à redução da potência óptica ao longo do comprimento da fibra, varia com o comprimento de onda e é expressa em decibel por quilômetro. Um decibel (dB) é a unidade usada para expressar a diferença relativa entre a potência de entrada P_i e a potência de saída P_o de um sinal e é calculado por Equação 3.3:.

$$NdedB = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_0} \right) \quad (3.3)$$

A atenuação para um comprimento de fibra L é dada por α dB/L , onde dB α é a atenuação expressa em dB/km . Ela pode ocorrer devido à absorção, espalhamento ou reflexões nos conectores e emendas.

Figura 9 – Índice de refração gradual.



Fonte: (TRONCO;AVILA,2007)

Absorção: A luz é absorvida quando passa através da fibra óptica devido à sua interação com a estrutura molecular do material.

Espalhamento: Ocorre devido às variações na densidade do material e do índice de refração do núcleo. Esta variação causa obstruções à passagem da luz e quando a mesma encontra estas obstruções, espalha-se em todas as direções e a maior parte continua a se propagar na direção original (energia perdida). Quando as obstruções são pequenas, menores que o comprimento de onda (λ), o espalhamento é chamado Rayleigh. As perdas por este espalhamento são proporcionais a $1/\lambda^4$. Comprimentos de onda longos tem menos espalhamento.

Reflexão: Enlaces longos de fibras ópticas consistem de vários segmentos conectados por emendas. Existem também conectores nas terminações das fibras. Emendas e conexões refletem o sinal na direção oposta da fibra reduzindo a potência da luz à frente. Conforme mencionado acima, a atenuação varia com o comprimento de onda. A Figura 9 ilustra a atenuação para uma fibra monomodo em função do comprimento de onda.

Dispersão é a distorção da forma do sinal óptico. Essas perdas são ditas lineares, pois são proporcionais ao comprimento da fibra.

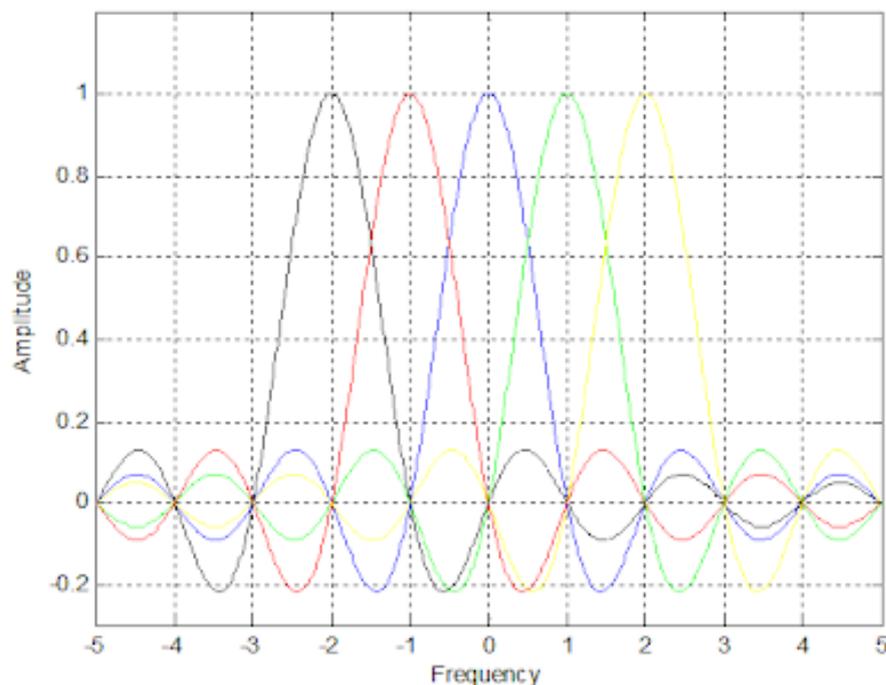
As perdas devido a efeitos não-lineares ocorrem devido à dependência do índice de refração com a intensidade do campo elétrico aplicado. Os principais efeitos não lineares desta categoria são: auto-modulação de fase *Self-Phase Modulation (SPM)*, Mistura de Quatro Ondas Four Wave Mixing (FWM), Espalhamento Brillouin Estimulado (*Stimulated Brillouin*

Scattering) e *Espalhamento Raman Estimulado Stimulated Raman Scattering (SRS)*. Estes efeitos ocorrem devido à interação das ondas de luz (campo elétrico) com os elétrons do material da fibra, mudando seu índice de refração. As fibras ópticas possuem uma resposta não linear a campos elétricos intensos.

3.4 Multiplexação por divisão de frequências ortogonais nas Redes Ópticas

A rede óptica se apresenta hoje como a rede que possui o maior potencial para transmitir boas taxas de transmissão. Como consequência dessa característica, ocorreu e ocorre grandes avanços nos estudos e desenvolvimentos de técnicas que levem ao seu melhoramento, sendo uma delas a aplicação da OFDM nas redes ópticas e o posterior desenvolvimento das redes ópticas elásticas, como é afirmado por (PEREIRA *et al.*, 2013) . "A OFDM é uma tecnologia de transmissão multi-portadora que transmite um fluxo de dados de alta velocidade, dividindo-o em várias subportadoras ortogonais (representadas na Figura 12) de mais baixa velocidade."

Figura 10 – Representação da atuação de cinco subportadoras



Fonte: Disponível em: <<https://www.pngegg.com/pt/png-xtifg>>. Acesso em: 22 de set. 2020.

A OFDM surgiu como evolução da técnica Multiplexação por Divisão de Frequência (FDM) que consiste em transmitir vários sinais dentro de um mesmo canal e utiliza-se de uma banda de guarda para a separação das subportadoras e garantir que não ocorra interferências

entre os sinais na sua recepção. Na OFDM a transmissão é realizada em alta velocidade e utiliza o cruzamento no ponto zero (ponto onde as subportadoras se encontram) entre as subportadoras no lugar da banda de guarda, isso garante para essa técnica a eliminação da interferência cruzada entre os sinais e é conhecido como ortogonalidade. É justamente essa característica de cruzar as subportadoras em ponto zero que dá a técnica OFDM a vantagem de um melhor aproveitamento do espectro.

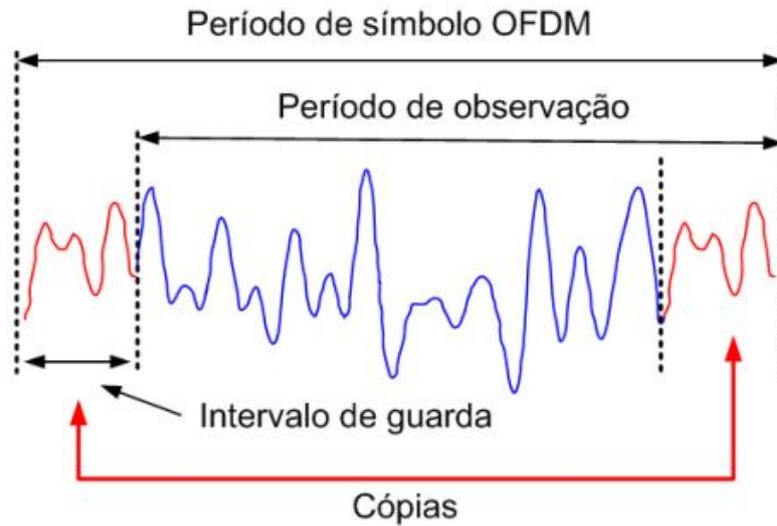
As suas subportadoras são moduladas a partir dos formatos de modulação (Quadrature Amplitude Modulation) (QAM) ou *Phase Shift Keying* (PSK) e possuem taxas de transmissão muito baixa, que diminuem diretamente ao número de subportadoras aplicadas no envio, o que implica na diminuição da sensibilidade à seletividade em frequência causada por multipercurso. Além disto a eficiência energética pode ser implementada nesta técnica, visando diminuir o consumo de energia através de modificações nas modulações aplicadas e possível desativação de subportadoras de acordo com a demanda.

Um dos problemas encontrados com a aplicação desta técnica é a incidência de interferência entre símbolos ocasionada quando o símbolo percorre uma longa distância e acaba por cruzar o limite do símbolo vizinho. Para evitar que ocorra tal interferência é projetado e introduzido um intervalo, chamado de intervalo de guarda, conforme demonstrado na Figura ?? . Neste ponto definimos a constituição de um símbolo OFDM (símbolo útil + intervalo de guarda). Tal ação de interferência acarreta em outra problemática conhecida como (*Intersymbol interference* - Interferências entre Portadoras (ISI)) que consiste na alteração de alguma característica do sinal transmitido por efeito de outro sinal durante a transmissão, que por sua vez é ocasionada a partir do desalinhamento das subportadoras a partir da inserção do intervalo de guarda, que afetará justamente na característica de ortogonalidade desta técnica, conforme é afirmado por (MOURA *et al.*, 2015) . Para que seja então amenizada, já que não pode ser eliminada por completo, introduz-se um prefixo cíclico no intervalo de guarda para resguardar a informação transmitida, como pode ser visualizado na Figura 11.

3.5 Redes Ópticas Elásticas

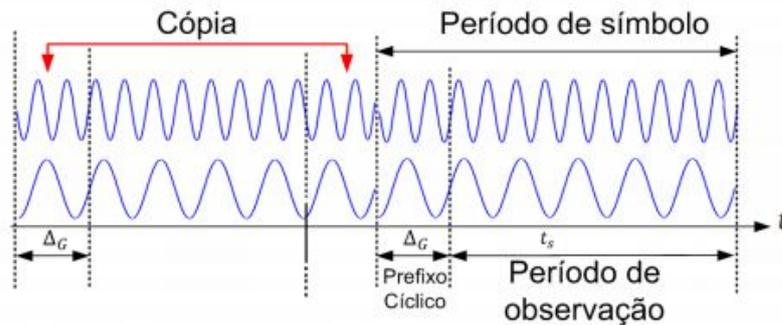
Atualmente a grade de transmissão óptica utilizada pela União Internacional das Telecomunicações (ITU) se concentra em transmissões de dados numa faixa fixa de 50 GHz de forma a padronizar o sistema conforme é afirmado por (TRONCO; AVILA, 2007), o que para os setores de telecomunicações e *datacom* atuais se apresentam com grande limitação (GERSTEL

Figura 11 – Demonstração do intervalo de guarda.



Fonte: (PEREIRA *et al.*, 2013)

Figura 12 – Demonstração do sinal OFDM + prefixo cíclico.



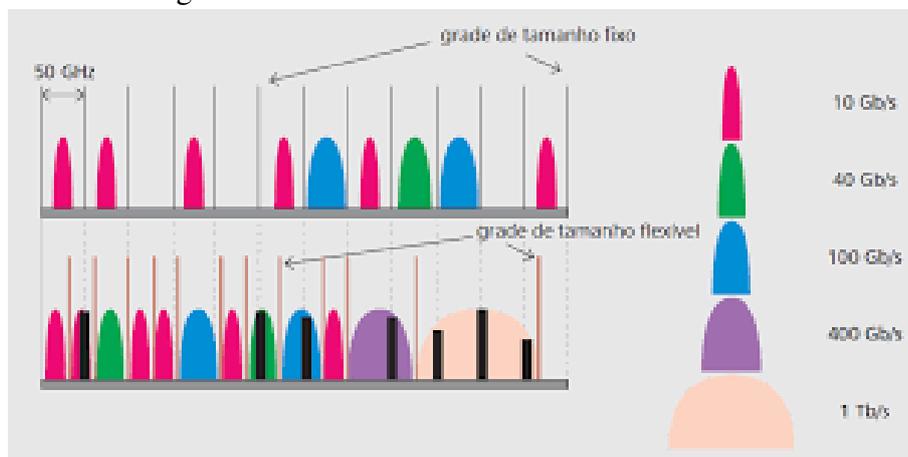
Fonte: (PEREIRA *et al.*, 2013)

et al., 2012), visto que a necessidade de transmissão de dados com taxas acima de 100 Gb/s vem se tornando cada vez mais constante e necessitam de uma largura de banda espectral maior para efetivar a transmissão. Essa necessidade para transmitir dados que possuem taxas mais elevadas e, conseqüentemente, necessitam de uma maior disponibilização de espaços na grade de transmissão e melhoria na velocidade de transferência, são as maiores justificativas para o desenvolvimento da rede óptica elástica, que chega para sanar esses problemas que se apresentam nas redes ópticas comum.

A problemática da grade fixa para alocação do caminho óptico ocasiona muitas vezes a alocação do espectro de forma ineficiente (alocado e gerando muito espaço de banda vazio ou o bloqueio do espectro para a transmissão, visto que o espaço disponível não o suporta), se tornou o ponto principal da rede óptica elástica (*Elastic Optical Network - EON*) que se apresenta com a principal característica de uma largura de banda flexível para os caminhos ópticos, como visto

na Figura 13 . "Nelas, o espectro da fibra é tratado como um recurso contínuo, possibilitando uma maior compactação e eficiência no uso do mesmo. Basicamente, o caminho óptico pode ser alocado em qualquer intervalo contínuo de frequência e deve ser separado de outros caminhos ópticos por uma banda de guarda, denominada de *Filter Guard Band* (FGB). Comutadores de comprimentos de onda seletivos *Wavelength-Selective Switches* (WSS) e filtros ópticos de largura de banda variável são utilizados para a comutação e a filtragem das larguras de banda flexíveis [Kozicki *et. al*, 2009]."(QUEIROZ; ASSIS, 2012).

Figura 13 – (a) Representação de grades fixas. (b) Representação das grades flexíveis da Rede EON.



Fonte: (CANDIA *et al.*,)

Para que essa transmissão espectral de sinais de alta taxa de dados seja eficiente, a exploração da rede óptica elástica apresenta contribuições que abrangem não somente a melhoria na transmissão de dados, mas também a diminuição do consumo de energia para a mesma atividade, o que no mundo atual e global é de grande valia. Sabe-se que uma das formas para atingir a eficiência na transmissão desses tipos de sinais é maximizar a eficiência espectral dos transceptores, de forma que estes se adaptem às condições de rede e taxa real. Tal metodologia aplicada em um modelo de rede flexível, com transceptores também flexíveis, poderiam se adaptar e mostrar resultados melhores as essas condições reais.

O modelo de rede EON chega para dinamizar e atender clientes com demandas diferentes, mas evitando que a qualidade de transmissão (*Quality of Transmission* - QoT) de dados seja afetada . Se apresenta ainda como ponto alto para aplicação da eficiência energética em redes de transmissão, já que estudos apontam que a aplicação de algumas técnicas de modulação e ainda o roteamento e alocação do espectro, assim como a escolha do menor caminho (o que possui menos nós), afeta diretamente no consumo de energia da rede. Como é citado por [Tomkos

et al., 2014] "Em comparação com as redes ópticas tradicionais de multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength-Division Multiplexing – WDM*), as EONs implementam mecanismos de alocação de largura de banda mais sofisticados, (i) baseados em subportadores ópticos OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), (ii) em abordagens de roteamento e de atribuição do espectro (*Routing and Spectrum Assignment – RSA*) e (iii) transmissores e comutadores ópticos de largura de banda variável (*Bandwidth-Variable transponder – BVT e Bandwidth-Variable Optical Cross-Connects – BV-OXC*). "Essas afirmativas são confirmadas no capítulo posterior, onde é apresentado a análise de estudos que demonstram alguns métodos e aplicação de algumas técnicas.

3.5.1 OFDM e as Redes Ópticas Elásticas

OFDM é uma técnica de modulação de transmissão que ajusta o caminho com base nas subportadoras e no formato de modulação, e busca a efficientização na transmissão. Para que isso ocorra é necessário a existência de dois parâmetros básicos, o espaçamento entre as subportadoras, que deve ser igual a taxa de transmissão (esta é dada pelo número de subportadoras multiplicada pela taxa de transmissão de cada subportadora). Já as subportadoras podem apresentar diferentes formas, mas que são moduladas pelo mesmo formato. "Os benefícios do OFDM são, alta eficiência espectral, boa imunidade à interferência de RF e baixa distorção de múltiplo percurso, o que é extremamente útil e desejável." (LOMONACO, 2006).

Para realizar o transporte eficiente de dados, a rede óptica elástica utiliza-se em sua composição de rede os seguintes componentes:

- Comutador óptico (OXC), que são independentes de largura de banda.
- *Transponders* de largura de banda variável (BVTs), que por sua vez podem ser baseados na OFDM.

A aplicação da técnica OFDM em redes ópticas elásticas possibilita o melhoramento da rede, tanto em relação a possibilidade da taxa adaptativa de alocação do espectro, que traz melhorias quanto ao problema de diferença de granularidade entre a camada do cliente e a camada de comprimento de onda física, quanto também à problemática relacionada à configuração da rede para atuar na transmissão de dados em curta e em longa distância, conforme dito por (SILVA, 2018).

Para o problema da taxa adaptativa vemos um melhoramento relacionado a possibilidade de alocar dinamicamente o espectro, a partir de qualquer intervalo contínuo de frequência

e que sejam separados por uma banda de guarda. Conforme (JINNO *et al.*, 2009), tal ação é possibilitada a partir do uso de "Comutadores de comprimentos de onda seletivos (*Wavelength-Selective Switches* – WSS) e filtros ópticos de largura de banda variável são utilizados para a comutação e a filtragem das larguras de banda flexíveis." Já na questão relacionado à distância, a melhoria ocorre a partir da possibilidade de modulação dinâmica, que em comparação a rede atual se baseia na escolha do caminho a partir do pior caso (podendo ser o mais longo e com mais gastos energéticos), no novo modelo será escolhido a partir de parâmetros que levam em consideração a distância do percurso, conservando assim os recursos espectrais de caminhos curtos. Conforme afirma (PEREIRA *et al.*, 2013) "A alocação de espectro baseado na distância pode conservar os recursos espectrais para caminhos curtos, necessitando bem menos recursos espectrais que a atual alocação de espectro para pior caso."

Como citado no início desta seção, para o funcionamento de uma rede óptica elástica faz-se necessário a utilização de componentes específicos e que permitem justamente a característica de elasticidade ou adaptação para funcionamento da rede. O OXC é um deste componentes e possui a característica de ter sua funcionalidade independente da largura de banda. Diferente do componente presente na rede tradicional, o comutador óptico faz a adaptação da largura de banda do canal de acordo com o comprimento do caminho óptico. Outro ponto ligado ao OXC é que a partir dele é possível estabelecer conexões ópticas diretas entre pontos de acesso, permitindo a evolução de uma rede linear para uma malha. Já o outro componente é o BVT, que é capaz de suportar múltiplas taxas de dados em subportadoras que posteriormente são enviadas a uma superportadora, visando justamente a melhor utilização dos recursos espectrais, que podem ser obtidas através da aplicações de técnicas como: ajuste do número de subportadoras e geração de sinal para superportadora.

4 TÉCNICAS DE ECONOMIA DE ENERGIA EM REDES ÓPTICAS

Uma das maiores problemáticas no mundo atual, e que mais desperta para a busca por soluções, é o elevado índice de consumo de energia observado tanto em países desenvolvidos, quanto subdesenvolvidos. Essa questão ocasionou e ainda gera discussões acadêmicas, financeiras e debates que enfatizam e buscam conscientizar quanto ao uso eficiente e sustentável de energia, além de instituições especializadas para tais discussões, como o Conselho Mundial de Energia (*World Energy Council* - (WEC)). Não distante desta realidade, temos as tecnologias de informação e comunicação (TICs), que com seus avanços são observados altos níveis de consumo de energia, impulsionando assim a busca por metodologias para eficientizar as redes de transmissão. Neste ponto entram as redes ópticas elásticas, que se apresentam como uma solução promissora para atender a alta demanda com índices reduzidos de consumo de energia quando comparado às técnicas de transmissão já difundidas, apresentando soluções energéticas para as redes de transmissão de dados. Com essa justificativa, vem sendo estudada e proposto algumas técnicas que visam como resultados a eficiência energética na transmissão de dados. Para a aplicação deste modelo de rede é necessário levar em consideração além da distância de transferência fatores como perda de fibra, limites Relação Sinal/Ruído Óptico (ONSR) e outros fatores que afetam diretamente na eficácia da transmissão. Esses tipos de técnicas abrangem diferentes pontos que podem ser adaptados e/ou melhorados na composição da rede óptica elástica. Nas próximas seções serão apresentados algoritmos e técnicas desenvolvidos visando melhorar a eficiência de energia tanto para redes ópticas tradicionais quanto para as EONs.

4.1 Algoritmo para redução do consumo de energia em redes WDM

Atualmente o sistema de transmissão de informações utiliza-se do modelo de rede WDM que possibilita a transmissão de vários feixes de luz em diferentes comprimentos de onda em uma mesma fibra óptica. Esses comprimentos de onda são transmitidos de forma independente o que permite que tais comprimentos sejam formados por diferentes fontes e não sofram interferências um do outro durante sua transmissão, já que cada sinal é transmitido por uma banda dedicada.

A grande problemática envolta desse modelo de rede é que suas grades de transmissão são fixas, tornando a rede ineficiente para transmitir os diferentes comprimentos de onda. Desta forma foi abordado e desenvolvido alguns modelos de algoritmo que buscam diminuir o consumo

de energia gerado durante as transmissões a partir do uso desse modelo de rede. Alguns desses algoritmos são abordados por (MANOUSAKIS *et al.*, 2013), (NOGUEIRA *et al.*, 2014). São eles:

- 1) MinW: O objetivo desse algoritmo é minimizar o número máximo de comprimentos de onda necessários para servir o tráfego entre todos os links. Este é o objetivo de minimização mais comum usado no problema de alocação de rota e comprimento de onda (*routing wavelength assignment* - RWA). As únicas restrições incorporadas neste algoritmo são os problemas clássicos de RWA (atribuição de comprimento de onda distinto, tráfego e restrições de continuidade de comprimento de onda). Portanto, MinW constitui um algoritmo RWA sem energia.
- 2)EA-RWA: O objetivo deste algoritmo é novamente minimizar a energia total consumida por todos os módulos ativos, escolhendo o caminho de menor consumo energético. Em redes translúcidas, o algoritmo divide o problema em um subproblema de colocação de regeneração e um subproblema EA-RWA para redes ópticas transparentes que são resolvidos sequencialmente.
- 3) JEA-RWA: O objetivo deste algoritmo é minimizar a energia total consumida por todos os módulos ativos na rede óptica. Este algoritmo resolve o problema de EA-RWA (*energy-aware routing and wavelength assignment*) em redes ópticas translúcidas, minimizando a energia consumida, onde a otimização é realizada em conjunto sobre a colocação dos regeneradores e a seleção dos caminhos ópticos.
- 4) MinEF: O objetivo desse algoritmo é minimizar as fibras extras dos links em uma rede multi-fibra. Define-se o termo fibras extras como as fibras adicionais exigidas por uma rede para estabelecer um conjunto de conexões quando os links de fibra única não são suficientes para estabelecê-las. Este algoritmo tenta exaurir a primeira fibra dos links e, se necessário, usa as demais fibras disponíveis por link. Presume-se que o uso da primeira fibra de um link não acrescente nenhuma penalidade ao objetivo de custo, mas cada fibra adicional necessária para servir o tráfego adiciona algum custo ao objetivo assim o consumo de energia é reduzida.
- 5) MinNI: O objetivo deste algoritmo é minimizar o número de interfaces (NIs).
- 6) MinAMP: O objetivo desse algoritmo é minimizar o número de amplificadores.
- 7) MinTRM: O objetivo deste algoritmo é minimizar o número de terminais add/drop.

A aplicação dos algoritmos citados acima somente é possibilitada na rede óptica

convencional WDM, impossibilitando sua aplicabilidade nas redes ópticas elásticas e tornando-os ineficientes. Desta maneira, na próxima seção é iniciada a abordagem de alguns algoritmos desenvolvidos para aplicação nas redes ópticas elásticas.

4.2 Algoritmos aplicados em Redes ópticas elásticas

4.2.1 Modulação Adaptativa

"Entre as diversas técnicas de melhorias destinadas a aumentar a capacidade dos sistemas de comunicações móveis está a adaptação de enlace. Ou seja, técnicas de adaptação, onde parâmetros de transmissão do sinal (modulação, taxa de código, etc) são dinamicamente adaptados às condições variantes do canal. "(LOMONACO, 2006)

Diversos tipos de modulações adaptativas são estudadas visando a eficiência energética nas redes EONS e alguns desses tipos serviram como base desse estudo. Em (BANDIRI *et al.*, 2020) "é realizado a abordagem de um esquema para atribuir formatos de modulação de acordo com a largura de banda atual e o número de *slot* de frequência necessário com foco no problema RMSA em redes ópticas elásticas". Esta proposta leva em consideração efeitos lineares e não lineares na camada física, pois conforme (BANDIRI *et al.*, 2020) "os efeitos lineares e não lineares não podem ser ignorados; uma vez que eles introduzem algumas deficiências na camada física, reduzindo a qualidade de transmissão (Quality of Transmission - QoT) do sistema."

Neste modelo de transmissão o número de *slots* presentes em um caminho óptico irá variar proporcionalmente de acordo com a largura de banda necessária solicitada, o que pode levar a ocorrência de que dois ou mais formatos de modulação se adequem e possam conduzir o mesmo *slot* de frequência. Este acontecimento pode levar a aplicação de um formato de modulação que seja menos eficiente, ou seja, que apresente uma maior taxa de símbolos por transmissão. O algoritmo Modulação adaptativa para o algoritmo de eficiência energética (AM-EE) proposto trabalha da seguinte forma: para cada pedido de conexão, primeiramente analisa e escolhe o caminho mais curto dentre dos K (segundo o algoritmo de Yen), logo é analisado o atendimento aos critérios de qualidade de transmissão, em seguida o algoritmo LMF é executado de forma a alocar o formato de modulação mais baixo e finalmente calcula o consumo de energia do caminho escolhido.

A análise desse algoritmo foi feita utilizando a topologia de rede nacional dos Estados Unidos (USA). Os pares de nós (fonte e receptor) foram selecionados aleatoriamente e

cada nó entre eles foi considerado como saltos e, os *slots* de frequência foram definidos com 12,5 GHz. Como resultado dos testes realizados com o algoritmo AM-EE, foi verificado que o mesmo apresentou uma eficiência energética média por resposta de 1,6 Gbps/J enquanto o mAdap (algoritmo utilizado para comparação) apresentou uma eficiência média de 2,2 Gbps/J, melhorando o sistema EON em 27% com a aplicação do algoritmo (AM-EE). Por fim o estudo mostrou que o *AM-EE* apresenta menor probabilidade de bloqueio. O motivo consiste que o AM-EE explora a flexibilidade oferecida por diferentes taxas de transmissão, o que permite um melhor ajuste da taxa de transmissão à atual capacidade solicitada para obter mais caminhos ópticos. Constatou-se uma menor largura de banda para quando o AM-EE é utilizado, assim como ocorre diminuição no consumo de energia, concluindo então que a aplicação do algoritmo AM-EE melhora a eficiência energética sem diminuir a qualidade de transmissão numa rede óptica elástica..

Já em (BANDIRI *et al.*, 2017) é analisado a redução do consumo de energia através da aplicação da estratégia de modulação adaptativa à distância (DAM), que funciona a partir da alocação dinâmica dependente do caminho óptico, que irá variar de acordo com cada distância. SEC-RSA é o algoritmo analisado neste artigo e foi a principal ferramenta para executar diversas simulações na topologia de rede EUA, ele trabalha a partir da atribuição do espectro de roteamento mais curto. Funciona com o seguinte princípio: "muda a modulação com o objetivo de melhorar a eficiência do espectro, assim, satisfazendo determinados requisitos de QoT (Qualidade de transmissão de energia)." e "Se um algoritmo não encontrar uma modulação apropriada para um caminho óptico determinado, a conexão solicitada será bloqueada e, em seguida, o processo é finalizado". (BANDIRI *et al.*, 2017) A partir das simulações ficou comprovado que o algoritmo de Atribuição de espectro de roteamento mais curto (SEC-RSA) apresenta o menor consumo de energia quando comparado com os tradicionais FIX-RSA e DA-RSA, além de apresentar bons resultados energéticos quando entramos no cenário de bloqueios de solicitações, o que para o SEC-RSA pode ser reduzido ao aumentar-se a taxa de transmissão.

No trabalho posterior de (BANDIRI *et al.*, 2018), temos que o algoritmo proposto é baseado no Modulação Adaptativa e Codificação (AMC), visando reduzir o consumo de energia de uma EON. Nesse modelo o formato de modulação e o Correção de erro antecipado (FEC) irão variar com base na distância do caminho óptico a ser percorrido e no ONSR, o consumo de energia obtido a partir dessas características é então comparado com o consumo real. Na simulação do novo algoritmo proposto, foi utilizado as topologias das redes dos Estados Unidos

e Alemã e o número máximo de conexões foi variado de 0 a 1000. Os resultados são obtidos e comparados para as técnicas de saltos mínimos, caminho mais curto e para o novo algoritmo AMC.

A partir do experimento onde não é considerado o bloqueio de conexões, obtém-se que o consumo de energia gasto cresce de acordo com o aumento de conexão solicitada e que dentre os três tipos de algoritmos analisados, o AMC se mostra o mais eficiente, seguido pelo MH e SP. As principais razões para o algoritmo AMC se mostrar o mais eficiente é que ele faz a alocação do espectro na melhor modulação e utiliza o FEC de maneira adaptável, ou seja, depende da distância física, o que influencia diretamente na escolha dos espectros mais eficientes e gera uma menor sobrecarga. “Para todos os três algoritmos, o consumo de energia aumenta com a distância entre o nó fonte e destino. Isso pode ser explicado pelo fato de que, quanto mais longo é o caminho da luz *lightpath*, mais saltos, EDFAs e BV-OXCs são percorridos produzindo aumento no consumo de energia”. (BANDIRI *et al.*, 2018)

Quando o bloqueio de conexão é aplicado no experimento os resultados obtidos são os seguintes: a probabilidade de bloqueio aumenta em função da taxa de transmissão e diminui de acordo o aumento do número de conexões, sendo assim para a rede dos EUA, que tem um tamanho maior em relação a da Alemanha, a taxa de bloqueio é maior. Em relação a eficiência do consumo, o algoritmo AMC se mostra mais uma vez mais eficiente que o SP e MH. Uma das justificativas desta eficiência é que o algoritmo AMC faz uso dos BVTs, que permite que a taxa de bits de transmissão seja ajustada de acordo com a necessidade da informação, influenciando no alcance máximo de um formato de modulação e na diminuição da probabilidade de bloqueio. Por fim verifica-se que o algoritmo AMC proposto se mostra como uma boa estratégia para diminuir o consumo de energia nas EONs e atende aos requisitos de qualidade de transmissão (QoT) e qualidade de serviço (QoS), porém requer um tempo médio de execução maior que os outros dois algoritmos analisados.

Diante dos artigos expostos, suas respectivas afirmativas e análises é possível afirmar que a modulação adaptativa se apresenta como uma solução plausível e de grande valia para a busca e alcance da eficiência energética nas redes EON.

4.2.2 Outros algoritmos para busca da eficiência energética em EONs

Uma das características de maior destaque das redes ópticas elásticas é a sua capacidade de adaptação diante das altas demandas de tráfego através da técnica OFDM, utilizando

várias subportadoras de taxas baixas, no entanto, a relação sinal/ruído para altas taxas pode causar danos significantes para transmissões de longas distâncias. Como forma de contrapor essa deficiência, temos a aplicação de técnicas de correção de erros com *hardwares* de baixo custo e alto desempenho.

O código de correção de erro antecipado (*Forward Error Correction - FEC*) é uma técnica que permite um aumento de ganho de vários decibéis (dB's) pelo uso de bits adicionais que permitem correção de erros nas redes comuns. Quando chega uma demanda na rede óptica é alocado uma FEC fixo o que em alguns casos, acaba gerando desperdício para o caminho óptico. Em (BANDIRI *et al.*, 2018) tem-se a abordagem e aplicação da alocação adaptativa do algoritmo AFEC-SEC visando a diminuição do consumo de energia no modelo de rede EON.

Quando é finalizado o cálculo dos possíveis menores caminhos, o algoritmo AFEC-SEC entra em trabalho e realiza a comparação do consumo de energia dos caminhos propostos, selecionando o de menor consumo e gerando bloqueios quando não há possibilidade de aplicação do FEC. Ao se comparar o desempenho do código AFEC-SEC com o cenário de aplicação FEC fixo, temos que, quando simulado sem ocorrência de bloqueios na rede, o consumo de energia cresce exponencialmente de acordo com o aumento de pedido de conexão, tanto para FEC fixo, quanto o adaptável AFEC-SEC. No entanto, o AFEC-SEC apresenta menor consumo de energia, da mesma forma quando temos o cenário com presença de bloqueios de conexão na rede.

Os bons resultados se mantêm quando é analisado a eficiência energética do sistema, "Isso porque o AFEC-SEC consegue adotar a flexibilidade proporcionada pelas diferentes taxas de transmissão e a granularidade mais fina, o que permite um melhor ajuste da taxa de transmissão de acordo com a capacidade real solicitada"(BANDIRI *et al.*, 2017). O estudo confirma que a economia de energia nas redes EON pode ser amplamente desenvolvida e aplicada.

Um "problema crítico do ponto de vista do provedor de serviço é a tolerância a falhas, como um único ponto de falha, por exemplo, em um link de rede, pode causar a queda de várias demandas já estabelecidas, com impacto negativo na Qualidade do Serviço(QoS)". (LÓPEZ *et al.*, 2012) O esquema de proteção contra falhas na transmissão mais utilizado é o esquema de 1+1, que garante alta disponibilidade e resiliência, porém acaba por gerar uma elevação no consumo de energia dessa rede. Este é o ponto de estudo do artigo de (LÓPEZ *et al.*, 2012), que aborda a possibilidade de adaptar a largura de banda do caminho de proteção, buscando a economia de energia. Graças à característica de flexibilidade presente nas redes EONs, que pode ser aplicada na variação da demanda por horário, o esquema se mostra bastante propício, levando

a valores de 27% de economia de energia.

"A ideia principal consiste em adaptar a taxa dos *transponders* nos caminhos de proteção para a carga de tráfego atual da rede por hora, a fim de ter menor consumo devido aos recursos de backup, mantendo alta confiabilidade."(LÓPEZ *et al.*, 2012). A redução de energia então será realizada com base na adaptação da taxa de backup dos *transponders* de acordo com os requisitos reais de tráfego por hora. Com o objetivo de comprovar a eficiência do método de proteção contra falhas adaptável, foi realizado um estudo de caso onde foi obtido como resultado a comprovação da economia de energia significativa na rede EON, graças à flexibilidade fornecida pelas subportadoras de taxa de bits fina.

Outra forma de buscar eficiência de acordo com a demanda é vista em (ZHAO *et al.*, 2017), que faz um estudo de direcionamento de tráfego para um caminho específico da rede, que inclui elementos específicos, permitindo assim que os elementos que não estejam sendo utilizados sejam desativados, mas é importante salientar que um dos efeitos adversos relacionado a essa atividade é a diminuição da qualidade de serviço oferecido na transmissão de dados e na conectividade da rede. O estudo foi baseado na primícia de desligar os elementos ociosos e equilibrar a qualidade de serviço, ocorrendo da seguinte forma: ao chegar o pedido de conexão é analisado primeiro se a qualidade de serviço é atendida pelos componentes já ativos, caso não seja, é realizado a mudança dos elementos inativos para ativos a partir de um esquema IEE-RSA, então a demanda é atendida . O algoritmo proposto apresenta bons resultados e atendimento a qualidade de serviço para os momentos que a carga da rede é baixa, porém, para momentos de alta carga na rede, não é possível atender a qualidade de serviço, o que pode acarretar em um consumo de energia mais elevado. O estudo se mostra atraente para futuros desenvolvimentos e aplicações nas redes ópticas.

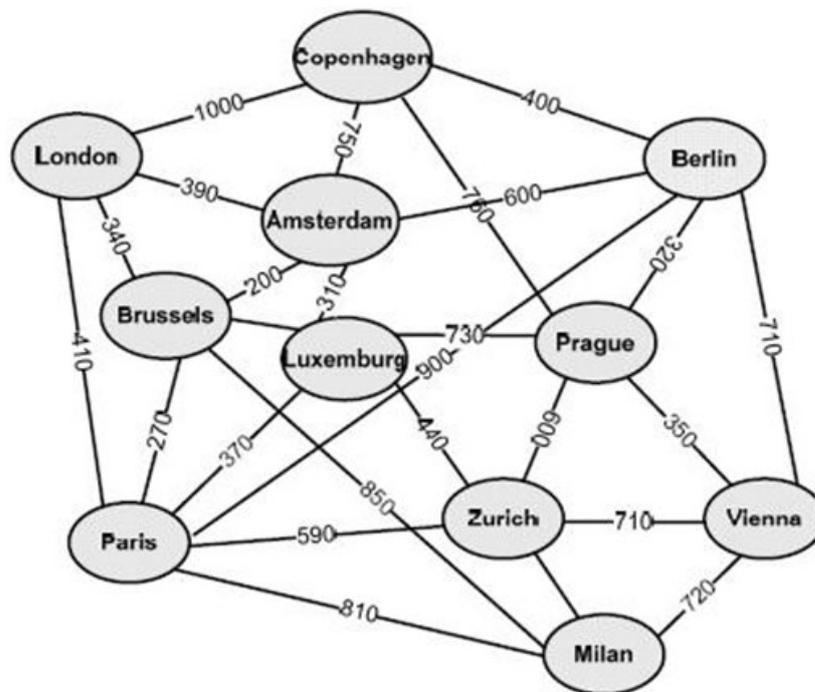
Como explanado neste capítulo, a existência de diversas técnicas e estudos possibilitam um maior desenvolvimento da rede óptica elástica para atendimento da alta demanda de forma a manter os níveis de consumo de energia reduzidos. No próximo capítulo iremos estender os estudos apresentados pelos autores citados usando outra topologia de rede óptica.

5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMPARATIVA ENTRE ALGORITMOS FIXOS E ADAPTÁVEL

Nesta seção iremos avaliar, analisar e comparar a eficiência e desempenho do algoritmo AMm-RSA (modificado para atuar junto a rede óptica elástica) frente aos algoritmos SP-RSA e MH-RSA, que comumente são utilizados em redes ópticas atuais, de forma a buscar e concretizar a economia de energia nas transmissões de informações.

Como base para a análise realizada nesse trabalho, foi utilizada a topologia de rede Pan-European COST 239 constituída de 11 nós (nomeados com o nome das capitais) e 22 enlaces (caminhos para conectar um nó ao outro), conforme pode ser visualizado na Figura 14. Para cada pedido de conexão, é realizada a escolha de dois nós aleatórios (que serão considerados como origem e destino) e os demais nós entre eles são devidamente considerados como saltos. Assim, por exemplo, para atender um pedido de conexão entre as capitais de London (nó de origem) e Conpenhagen (nó destino), seriam possíveis utilizar-se de alguns caminhos, dentre eles os três menores seriam os demonstrados nas Figuras (15, 16 e 17):

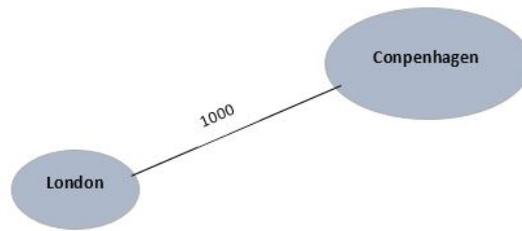
Figura 14 – Topologia da rede Pan-European COST 239.



Fonte:(ZHAO *et al.*, 2014)

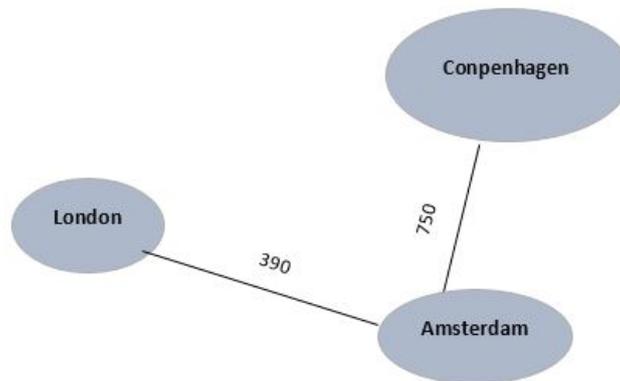
Onde o melhor caminho seria o primeiro caso apresentado, onde o consumo de energia é 1000 kW, seguido pelo segundo caso onde se tem um consumo de 1140 kW e por último o terceiro caso com consumo apresentado de 1290 kW.

Figura 15 – Primeira possibilidade de conexão London - Conpenhagen.



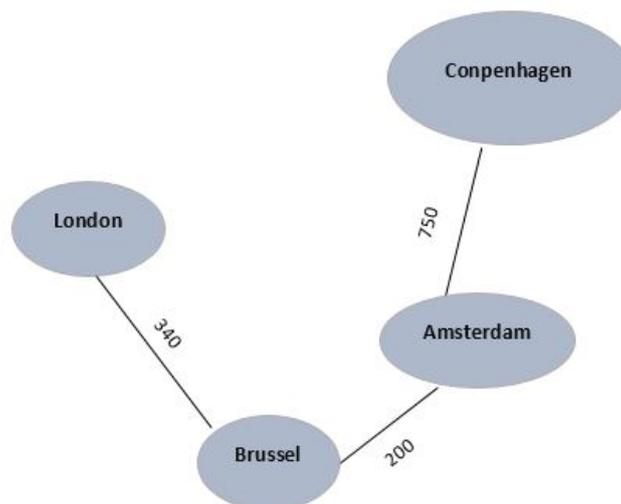
Fonte:Autora.

Figura 16 – Segunda possibilidade de conexão London - Conpenhagen.



Fonte:Autora.

Figura 17 – Terceira possibilidade de conexão London - Conpenhagen.



Fonte:Autora.

Foram ainda utilizados os algoritmos SP, MH e AMm durante as simulações, onde segundo (BANDIRI *et al.*, 2018) temos que cada algoritmo funciona da seguinte maneira:

- O algoritmo de Atribuição do caminho mais curto (SP-RSA) emprega modulação fixa para todos os pedidos de conexão recebidos e usa o algoritmo *Dijkstra* para selecionar o caminho mais curto. Finalmente, o consumo de energia para o trajeto mais curto é calculado.
- O algoritmo de Atribuição do caminho com menos saltos (MH-RSA) seleciona o caminho óptico com o mínimo de saltos e adota a modulação fixa para todos os pedidos de conexão recebidos; finalmente, o consumo de energia do caminho óptico selecionado é calculado.
- O AMm-RSA executa o algoritmo de Yen para selecionar os k-caminho mais curtos em termos de distância física. Depois disso, o formato de modulação adequado é alocado para cada k caminho mais curto selecionado. Finalmente, o consumo de energia é calculado e o menor é escolhido. Neste modelo proposto o algoritmo não considera bloqueios ocorridos no caminho.

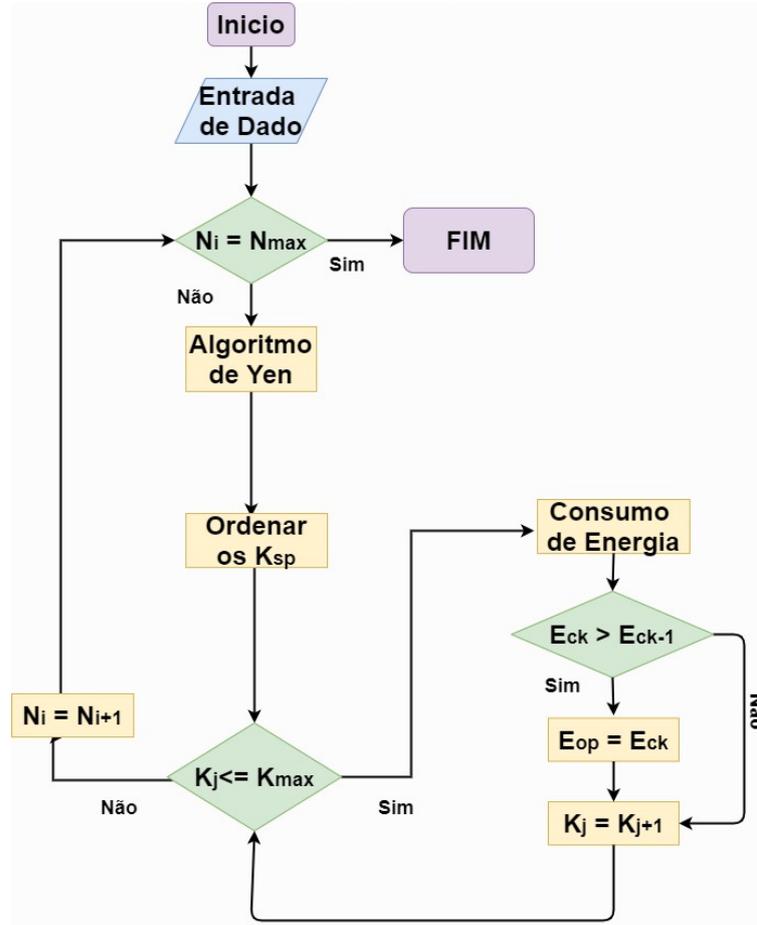
Inicialmente foram utilizados os algoritmos SP-RSA (*Shortest Path*), que consiste em empregar a menor distância física entre os nós fonte e destino, e o algoritmo MH-RSA (*Minimum Hops*) que consiste em empregar o caminho com menor número de saltos entre a fonte e destino. Nestes dois casos é utilizado uma modulação fixa para qualquer tipo de conexão. Por fim, é utilizado o algoritmo Modulação adaptativa modificado de atribuição de espectro (AMm-RSA) (*Modified Adaptive Modulation*) que utiliza-se de uma modulação adaptativa, que será definida em função da distância máxima entre os dois nós.

As simulações foram realizadas no programa *MATLAB* seguindo-se os seguintes parâmetros:

- Foi executado separadamente e por etapa os algoritmos: SP-RSA, MH-RSA e AMm-RSA;
- Todas as simulações foram realizadas sem bloqueios;
- Não foi utilizado nenhum código FEC durante as simulações;
- Como base, foi utilizada a topologia de rede Pan-European COST 239 para gerar as conexões;
- As simulações para foram executadas, separadamente para as seguintes quantidades de conexões: 100, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 e 3000.
- Utilizou-se as seguintes variações para os caminhos nas conexões: 1, 3 e 5.

O algoritmo utilizado para execução das simulações está representado na Figura 18.

Figura 18 – Fluxograma do Algoritmo para determinar modulação.



Fonte: Autora.

Seu funcionamento é iniciado a partir da entrada primária de dados onde é definido o pedido de conexão (N_i) para uma determinada rede, no caso do estudo a rede utilizada é a rede Europeia, onde dois nós são então escolhidos aleatoriamente sendo um definido como origem e o outro como destino. Em sequência o algoritmo Yen é executado possibilitando a escolha do menor caminho óptico (K_j) entre origem e destino (para este trabalho K_{max} que é a variação do número de caminhos por conexão, irá variar de 1,3 e 5) e em sequência todos os menores caminhos propostos são então ordenados. O próximo passo executado pelo algoritmo é o cálculo do consumo de energia para o caminho inicial (E_{ck}) e posteriormente para os demais caminhos (E_{ck-1}), se o consumo de energia para o caminho inicial for menor que para os demais caminhos, ele é considerado como consumo ótimo e então escolhido.

Diferente do algoritmo abordado por (BANDIRI *et al.*, 2018), neste trabalho o algoritmo simulado considera somente a performance sobre o consumo de energia destes K caminhos. De forma que não é verificado se ocorre atendimento aos quesitos de qualidade de transmissão, assim como também não é verificado se ocorre bloqueios durante as solicitações

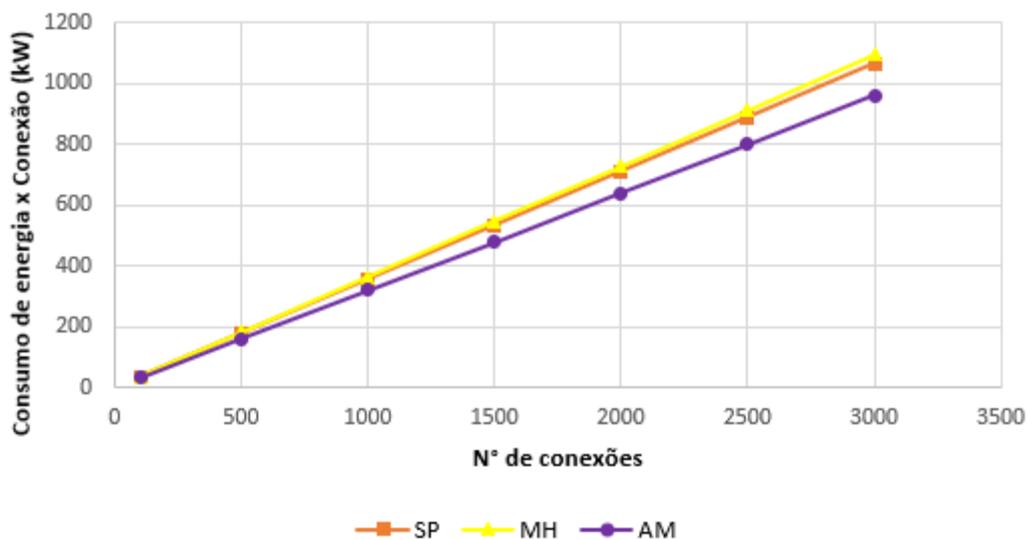
de conexões.

Ao longo do funcionamento do algoritmo são avaliados todos os k caminhos proposto e são então comparados entre si, escolhendo-se o de menor consumo. O procedimento é então repetido até que todas as solicitações de conexão e variação de caminhos propostos sejam atendidos.

5.1 Resultados Obtidos

As simulações foram realizadas para cada algoritmo separadamente e atendendo a demanda de caminhos por etapa. A primeira etapa das simulações tem seus resultados demonstrados na Figura 19, onde é possível visualizar a variação do consumo de energia dos três algoritmos para a primeira cena: 1 caminho por conexão + variações dos números de solicitações de conexões.

Figura 19 – Simulação dos algoritmos SP, MH e AMm para 1 caminho.

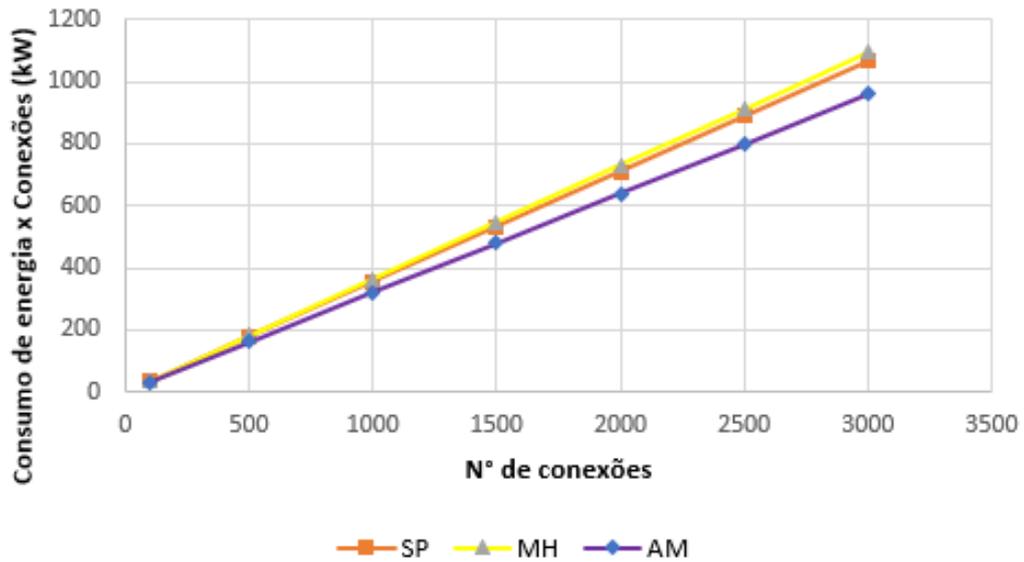


Fonte: Autora.

Nos cenários seguintes a relação da quantidade de caminhos por números de conexões é aumentada, onde a segunda etapa de simulações que tem como parâmetros 3 caminhos por conexão e variação do número de conexões, foi simulado e está demonstrado na Figura 20. Por fim a terceira etapa que consiste em 5 caminhos por conexão foi plotada na Figura 21.

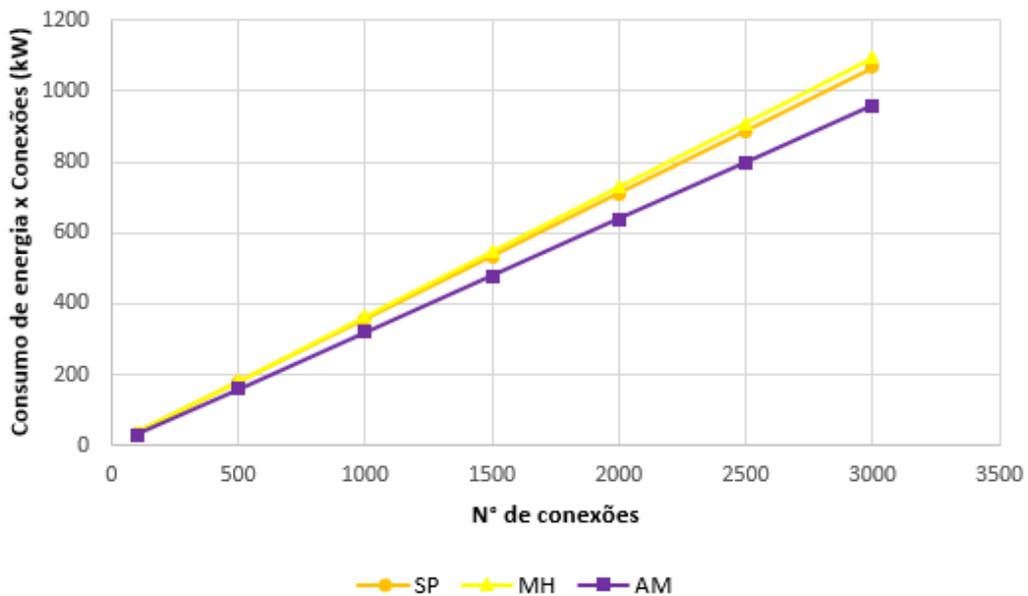
Como resultados dessas simulações é possível observar que o comportamento de consumo de energia dos três algoritmos possui uma diferença irrisória no primeiro ponto analisado (100 conexões), sendo observado um aumento da diferença deste consumo conforme

Figura 20 – Simulação dos algoritmos SP, MH e AMm para 3 caminhos.



Fonte: Autora.

Figura 21 – Simulação dos algoritmos SP, MH e AMm para 5 caminhos.



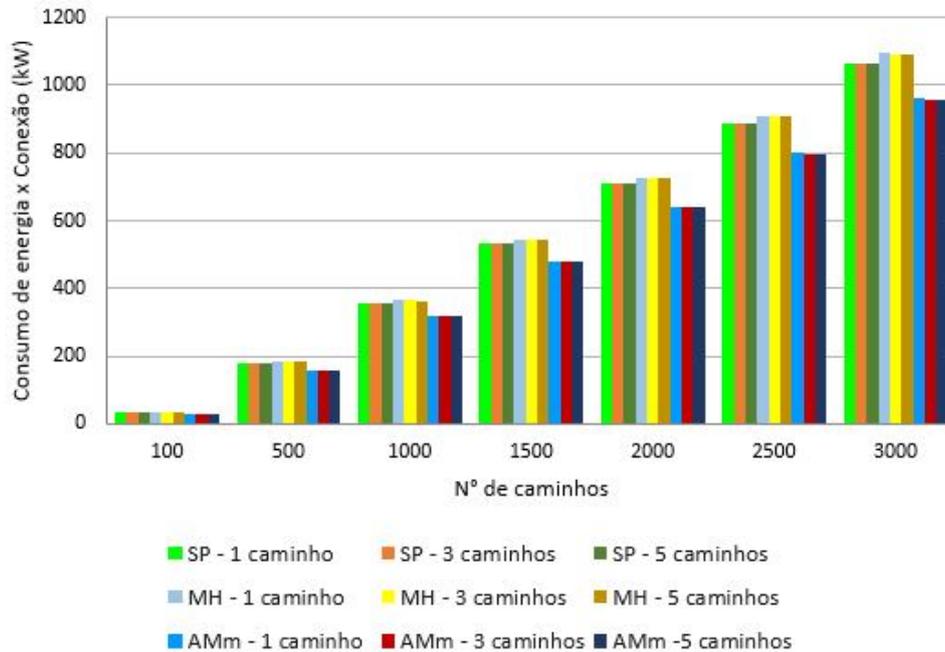
Fonte: Autora.

aumenta-se os números de solicitações de conexões, tornando os algoritmos SP e MH menos eficientes em relação ao AMm-RSA.

Outro ponto a ressaltar-se em relação ao desempenho dos três algoritmos, é que o consumo de energia aumenta de forma linear em relação a aumento nas solicitações de conexão, conforme pode ser visto na Figura 22.

A variação do consumo de energia, obtido de acordo com a variação dos caminhos

Figura 22 – Demonstração dos resultados de consumo de energia por conexão.



Fonte: Autora.

por conexão solicitados durante a simulação feita neste trabalho, estão dispostos nas tabelas 3,4 e 5, onde é possível analisarmos de melhor maneira a variação no consumo gerado.

Tabela 3 – Valores de consumo obtidos para 1 caminho por conexão.

Nº de conexões	SP-RSA	MH-RSA	AMm-RSA
100	34,5557	35,4635	31,3185
500	178,4184	182,9943	160,4207
1000	355,4985	364,6501	320,0195
1500	532,9284	546,665	479,757
2000	710,6548	728,9765	640,0933
2500	887,6892	910,5959	799,4691
3000	1066,404	1093,896	960,1762

Fonte: Autora.

Por fim podemos analisar o comportamento dos algoritmos para o contexto de 3000 solicitações de conexões tomando as variações de 3 e 5 caminhos. Esse cenário proposto demonstra uma situação mais realística, onde a quantidade de usuário e/ou comunicações em uma mesma rede óptica é por diversas vezes elevada, podendo gerar um aumento no consumo de energia para atender tais demanda, ou seja, em aplicações reais essas diferenças de consumo de energia ficam mais evidentes, já que os os dados de solicitações tidos no ensaio são consideravelmente menores que os observados nas redes físicas de transmissão de dados.

É possível observar, a partir dos resultados dispostos na Figura 23, que ao aumentar

Tabela 4 – Valores de consumo obtidos para 3caminhos por conexão.

Nº de conexões	SP-RSA	MH-RSA	AMm-RSA
100	34,5323	35,4401	31,2805
500	178,294	182,8698	160,2036
1000	355,2746	364,4262	319,5892
1500	532,5783	546,315	479,1125
2000	710,2345	728,5562	639,3032
2500	887,1352	910,0419	798,4551
3000	1065,731	1093,222	958,9622

Fonte: Autora.

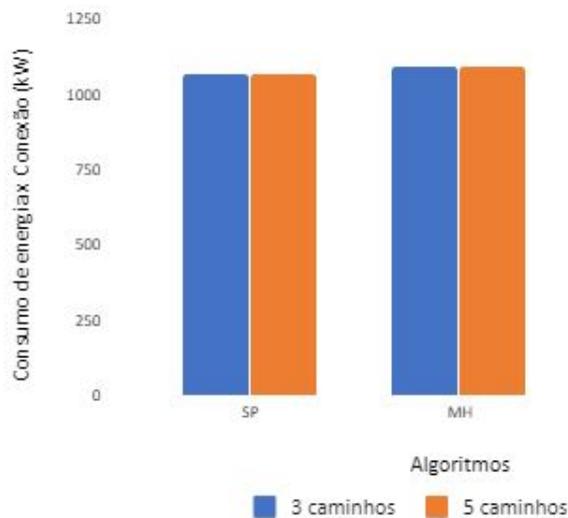
Tabela 5 – Valores de consumo obtidos para 5 caminhos por conexão.

Nº de conexões	SP-RSA	MH-RSA	AMm-RSA
100	34,5323	35,4401	31,273
500	178,2889	182,8647	160,1745
1000	355,2695	364,4212	319,5351
1500	532,5699	546,3066	479,0367
2000	710,2228	728,5444	639,219
2500	887,1185	910,0251	798,3442
3000	1065,712	1093,204	958,8355

Fonte: Autora.

a quantidade de solicitações de conexões, assim como a quantidade de caminhos, os atuais algoritmos utilizados (SP-RSA e MH-RSA) se mostram ineficientes quando comparados ao algoritmo de modulação adaptativa AMm-RSA, que é proposto para as novas redes ópticas elásticas como forma de eficientizar e diminuir o consumo de energia nas mesmas.

Figura 23 – Comportamentos dos algoritmos para 3000 conexões com 3 e 5 caminhos.



Fonte: Autora.

6 CONCLUSÕES

De acordo com o que foi fundamentado no capítulo 4 deste trabalho, o algoritmo *AMm-RSA* se apresenta como uma das ferramentas de melhoria no desempenho das redes ópticas em vários cenários, sendo alguns deles a redução no consumo de energia e na eficiência energética das redes de comunicação. A partir das simulações realizadas e demonstradas neste trabalho, podemos confirmar que diante dos algoritmos usados atualmente para atender as elevadas demandas por comunicação, ele mostra-se como uma das possíveis saídas para melhoria e controle/diminuição do consumo de energia apresentado por este setor, por ter principalmente como princípio uma alocação de modulação que irá se adaptar as demandas reais contribuindo assim para que seu consumo de energia seja ao máximo minimizado. Em concordância aos resultados obtidos pelas simulações, o algoritmo *AMm-RSA* apresenta uma eficiência média no consumo de energia quando comparado ao algoritmo *SP-RSA* em torno de 10% e quando comparado ao algoritmo *MH-RSA* de 12%, confirmando mais uma vez seu bom desempenho e atuação para suprir as necessidades de diminuição no consumo de energia.

REFERÊNCIAS

- BANDIRI, S.; MARANTE, F.; PIMENTA, T. C.; SPADOTI, D. H. Energy consumption improvement based on adaptive fec code in elastic optical network. In: IEEE. **2018 IEEE 9th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS)**. [S.l.], 2018. p. 1–4.
- BANDIRI, S. Y.; BRAGA, R. M.; PIMENTA, T. C.; SPADOTI, D. H. Energy consumption improvement based on distance adaptive modulation in elastic optical network. In: IEEE. **2017 International Caribbean Conference on Devices, Circuits and Systems (ICCDCS)**. [S.l.], 2017. p. 29–32.
- BANDIRI, S. Y.; PIMENTA, T. C.; DURAND, F. R.; SPADOTI, D. H. Adaptive modulation allocation algorithm in elastic optical networks. **International Journal of Communication Systems**, Wiley Online Library, p. e4581, 2020.
- BANDIRI, S. Y. M.; PIMENTA, T. C.; SPADOTI, D. H. Adaptive modulation and code strategy to reduce energy consumption in elastic optical network. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, SciELO Brasil, v. 17, n. 1, p. 65–84, 2018.
- BRANDAO, F. G. Modelos e algoritmos para o projeto de redes ópticas wdm. Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- CANDIA, M. P. L. de; CARVALHO, S. V. de; RODRIGUES, R. d. C. M. Modelo markoviano para alocação de espectro em redes wdm flexíveis.
- FONTINELE, A. C. Um novo algoritmo rsa ciente de imperfeições de camada física para redes ópticas elásticas. 2017.
- FUKUDA, R. M. Sistema de comunicação ofdm: da fundamentação conceitual à implementação em plataforma dsp. 2016.
- GERSTEL, O.; JINNO, M.; LORD, A.; YOO, S. B. Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer? **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 50, n. 2, p. s12–s20, 2012.
- JINNO, M.; TAKARA, H.; KOZICKI, B.; TSUKISHIMA, Y.; SONE, Y.; MATSUOKA, S. Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies. **IEEE communications magazine**, IEEE, v. 47, n. 11, p. 66–73, 2009.
- KEISER, G. **Comunicações por Fibras Ópticas-4**. [S.l.]: AMGH Editora, 2014.
- LOMONACO, M. de O. **Alocação de Conversores de Comprimento de Onda em Redes Parciais**. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2006.
- LÓPEZ, J.; YE, Y.; LÓPEZ, V.; JIMENEZ, F.; DUQUE, R.; KRUMMRICH, P. M.; MUSUMECI, F.; TORNATORE, M.; PATTAVINA, A. Traffic and power-aware protection scheme in elastic optical networks. In: IEEE. **2012 15th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (NETWORKS)**. [S.l.], 2012. p. 1–6.
- MANOUSAKIS, K.; ANGELETOU, A.; VARVARIGOS, E. Energy efficient rwa strategies for wdm optical networks. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, IEEE, v. 5, n. 4, p. 338–348, 2013.

MOURA, P. M. *et al.* Roteamento e alocação de espectro em redes ópticas elásticas. [sn], 2015.

NOGUEIRA, P. H. T. d. M. *et al.* Algoritmos para alocação de rota e comprimento de onda com restrições de energia e da camada física em redes ópticas. Universidade Federal da Paraíba, 2014.

PEREIRA, P. M. *et al.* Redes ópticas elásticas. **Trabalho de Conclusão de Curso. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo**, 2013.

QUEIROZ, I. M.; ASSIS, I. Redes ópticas elásticas: Planejamento e otimização. **Proc. CSBC.**, 2012.

SILVA, K. A. d. Avaliação de desempenho de métricas de fragmentação de espectro em redes ópticas elásticas. 2018.

TRONCO, T. R.; AVILA, L. F. de. Fundamentos de comunicações ópticas. **1a Edição: Abril de**, 2007.

ZHAO, J.; YAO, Q.; LIU, X.; LI, W.; MAIER, M. Distance-adaptive routing and spectrum assignment in ofdm-based flexible transparent optical networks. **Photonic Network Communications**, Springer, v. 27, n. 3, p. 119–127, 2014.

ZHAO, J.; ZHANG, N.; REN, D.; HU, J. Energy-efficient routing and spectrum assignment algorithm with physical-layer impairments constraint in flexible optical networks. **Journal of Optical Communications**, De Gruyter, v. 38, n. 4, p. 417–424, 2017.