

Rafael de Souza Martins Braga

# **Algoritmos de roteamento em Redes Ópticas visando redução do consumo energético**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia da Computação e como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência em Ciências e Tecnologia da Computação

Universidade do Federal de Itajubá - UNIFEI - Mestrado em Ciências e Tecnologia da Computação

Orientador: Danilo H. Spadoti

Itajubá  
Maio, 2018

# Agradecimentos

Primeiramente a Deus, pelas bênçãos e pela oportunidade de concluir mais esta etapa na minha vida.

A minha esposa Bárbara por me dar seu amor, ser paciente, me ajudar e estar do meu lado sempre, seja nos momentos alegres e também nos difíceis.

Aos meus pais Maria Helena e Herman Brix por ter me criado e mostrado como os estudos são importantes.

Aos meus amigos Rafael Sod, Leonato Ieire, Samir pelos momentos alegres e risadas durante toda essa jornada.

Aos amigos da The Best que estão esperando pela finalização dessa etapa da minha vida para voltamos a jogar RPG.

Aos professores do curso de Mestrado em Tecnologia em Ciências da Computação que sempre estavam dispostos a ajudar quando surgia duvidas e por ensinar que a vida não é fácil e que precisamos sempre nos esforçar.

E em especial ao meu orientador Danilo, que me ajudava sempre e me guiava para caminho certo para realizar uma boa dissertação e sempre me cobrou prazos mesmo muitas vezes eu não os cumprindo. Sou eternamente grato por sua dedicação, paciência e guia.

# Resumo

Na última década, com crescimento do consumo de energia devido a uma demanda cada vez maior, encontrar soluções que promovam redução no gasto de energia se tornou um foco de pesquisa importante. Esta dissertação, propõe a criação de três novos algoritmos ER-MA, FEC ADAPTATIVO e ROE-TH, sendo o objetivo a redução do consumo de energia. O principal conceito por trás dos dois primeiros algoritmos é a adaptabilidade, aplicada à modulação (ER-MA) e ao código de correção (FEC ADAPTATIVO). Em cada cenário de rede os algoritmos determinam qual a melhor configuração possível de acordo com o cenário da conexão. O terceiro algoritmo ROE-TH é uma técnica resultante da combinação dos algoritmos anteriores. Portanto modulação e código de correção de erro são alteradas paralelamente. Os resultados obtidos revelam que o consumo de energia e taxa de bloqueio foram reduzidas em todos cenários testados, obtendo uma redução variando de 47 a 70% no que tange consumo energético e taxas de bloqueio no intervalo de 9 a 11%.

**Palavras-chave:** Consumo de energia, Modulação Adaptativa, Fec Adaptativo, taxa de bloqueio, Algoritmo Híbrido

# Abstract

In the last decade, with the growth of energy consumption due to increasing demand, finding solutions to promote a energy redution has become a major researched focus. This dissertation proposes the creation of new algorithms ER-MA, FEC ADAPTATIVO and ROE-TH. Talking the main objective reductionof energy consumption. The concept behind the two algorithms is adaptability, witch is modulation (ER-MA) and to the correction code (ADAPTIVE FEC). So that in each new connection the algorithms determine the best possible configuration according to the connection scenario. The third algorithm ROE-TH is a technique resulting from the combination of former algorithms. Therefore modulation and error correction code are changed in parallel. The results show that the energy consumption and blocking rate were reduced in all scenarios tested, obtaining a reduction varying from 47 to 70 % in terms of energy consumption and blocking rates in the range of 9 to 11 %. **Keywords:** Power Consumption, Adaptive Modulation, Adaptive

Fec, Blocking Rate, Hybrid Algorithm

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUCAO</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura do Trabalho	3
<b>2</b>	<b>DESCRIZAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>4</b>
2.1	Considerações Iniciais	4
2.2	Modulação Digital	6
2.2.1	Modulação Adaptativa	6
2.2.2	Código de Correção de Erro	8
2.3	Grafos	10
2.4	Redes Ópticas	12
2.4.1	História das Redes Ópticas	12
2.4.2	Características das Redes Ópticas	13
2.4.3	Topologias de Redes Ópticas	15
2.4.4	Arquitetura de Redes Ópticas	16
2.4.5	Técnicas de Multiplexação	17
2.4.6	Tecnologia WDM	18
2.4.7	Roteamento e atribuição de comprimento de onda	20
<b>3</b>	<b>MODELO DE CONSUMO DE ENERGIA EM REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS</b>	<b>22</b>
3.1	Considerações iniciais	22
3.2	Determinando a modulação e o Código FEC em Redes de Fibra Óptica	23
3.3	Consumo de energia em redes ópticas elásticas	26
3.3.1	Consumo de Energia do Transmissor	26
3.3.2	Consumo de Energia do Receptor	28
3.3.3	Consumo de energia no Amplificador EDFA	29
3.4	Considerações finais	29
<b>4</b>	<b>ALGORITMOS E RESULTADOS</b>	<b>30</b>
4.1	Atribuição de Espectro de Roteamento utilizando Modulação Adaptativa - ER-MA	31
4.2	Atribuição de roteamento com FEC adaptativo - FEC ADAPTATIVO	37
4.3	Técnica Híbrida em Redes ópticas Elásticas - ROE-TH	41

<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>44</b>
<b>5.1</b>	<b>Publicações</b> . . . . .	<b>45</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>46</b>
	<b>ANEXO A – PARÂMETROS DO ENLACE DA FIBRA ÓPTICA</b> .	<b>51</b>
	<b>ANEXO B – VARIÁVEIS DO CONSUMO DE ENERGIA</b> . . . . .	<b>52</b>
	<b>ANEXO C – ALGORITMO EM MATLAB</b> . . . . .	<b>53</b>

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Consumo de energia em redes de telecomunicações . . . . .	4
Figura 2 – Esquema de constelações das Modulações BPSK,QPSK e 16QAM [20] .	7
Figura 3 – (a) Grafo não direcionado,(b) grafo direcionado . . . . .	10
Figura 4 – Arpanet, exemplo de grafos em redes . . . . .	11
Figura 5 – Arpanet, grafo com abstrações . . . . .	11
Figura 6 – Evolução do Sistemas de Comunicação . . . . .	12
Figura 7 – Estrutura Interna Fibra óptica . . . . .	14
Figura 8 – Visão geral da arquitetura de redes ópticas . . . . .	15
Figura 9 – Arquitetura de uma rede óptica, com OLTs, OADMs e OXCs . . . . .	16
Figura 10 – OXC de tamanho $N \times N$ ( $N =$ número de comprimentos de onda, M = número de fibras de entrada/saída . . . . .	17
Figura 11 – (a) Multiplexação por TDM e (b) WDM . . . . .	18
Figura 12 – Representação de um enlace WDM . . . . .	19
Figura 13 – Uso de OADM em um enlace ponto a ponto . . . . .	20
Figura 14 – Conexões em caminhos ópticos de rede WDM . . . . .	20
Figura 15 – Digrama de Blocos dos sistemas de transmissão baseado em OFDM . .	22
Figura 16 – Alcance da transmissão versus taxa de bits . . . . .	24
Figura 17 – Largura de Banda requerida Versus Número de Slots . . . . .	25
Figura 18 – Rede nacional dos EUA [7] . . . . .	30
Figura 19 – Rede Alemã [8] . . . . .	31
Figura 20 – Exemplo de Rede utilizando Alocação de Modulação Adaptativa . . . .	32
Figura 21 – Consumo de energia em função do número de conexões para as modulações	33
Figura 22 – Consumo total de energia para 1000 conexões em função do número de Conexões para ER-MA,MODULAÇÃO FIXA e DISTÂNCIA ADAP- TATIVA . . . . .	35
Figura 23 – Consumo de energia versus numeros de conexões . . . . .	35
Figura 24 – Caminho óptico para alocação do FEC adaptativo . . . . .	37
Figura 25 – Consumo de energia versus numeros de conexões, considerando os três cenários testados, FEC FIXO, FEC ADP $K = 1$ e FEC ADO $K = 3$ .	39
Figura 26 – Consumo de energia considerando 2000 conexões . . . . .	39

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Gerações de códigos corretores de erro para sistemas ópticos [25] . . . . .	9
Tabela 2 – Relação do desempenho de cada modulação em termos de eficiência espectral, número de slots e MDT [25] . . . . .	25
Tabela 3 – Tabela Comparativa da probabilidade de bloqueio, Consumo Total de energia para os algoritmos MODULAÇÃO FIXA, DISTÂNCIA ADAPTATIVA e ER-MA . . . . .	36
Tabela 4 – Número de conexões bloqueadas para o algoritmo FEC ADAPTATIVO, ER-MA, HAMC-RSA . . . . .	42
Tabela 5 – Comparação entre Algoritmo ER-MA e ROE-TH com base na taxa de bloqueio . . . . .	42

# Lista de abreviaturas e siglas

FEC ADAPTATIVO - Adaptive Forward Error Correction Routing and Spectrum Allocation

ER-MA - Adaptive Modulation Routing and Spectrum Allocation

ASE - Amplified spontaneous emission

BCH - Bose, Chaudhuri e Hocquenghem

BVT - Bandwidth-Variable Transponder

BV-WXC - Bandwidth-Variable Wavelength Cross-Connects

CP - Cyclic Prefix

EDFA - Erbium Doped Fiber Amplifier

EO - Electro-Optical

EON - Elastic Optical Networks

FEC - Forward Error Correction

FS - Frequency Slot

FSU - Frequency Slot Unity

FWM - Four-wave mixing

HAMC-RSA - Hybrid Adaptive Modulation and Code Routing and Spectrum Allocation

IFFT - Inverse fast Fourier transformation

LDPC - low-density parity-check LDPC

MDT - Maximum Distance Transmission

MPSK - Multiple Phase-Shift Keyed

MZ - Mach-Zehnder

OSNR - Optical Signal to Noise Ratio

QAM - Quadrature amplitude modulation

QoS - Quality of Service

QoT - Quality of Transmission

RMLSA - Routing, Modulation Level and Spectrum Allocation

RSA - Routing and Spectrum Allocation

RWA - Routing and Wavelength Assignment

SNR - Signal Noise-to-Ratio

SPM - Self-phase modulation

TIA / AGC - Trans-impedance amplifier with automatic gain control

WDM - Dense Wavelength Division Multiplexing

XPM - Cross Phase Modulation

# 1 Introdução

## 1.1 Motivação

Atualmente, o gasto de energia dos equipamentos de uma rede de telecomunicações representa uma parcela significativa de todo o consumo mundial. Da mesma forma, há serviços que necessitam de uma grande quantidade de largura de banda, como: serviços de *voipe streaming* e os equipamentos de suporte à tecnologia da informação. Esses serviços nas atuais redes de telecomunicações demandam uma imensa quantidade de energia para sua operação. Hoje, o consumo de energia relacionado à infraestrutura de informação e comunicações (ICT) representa por volta de 8% de toda a energia consumida no mundo e se estima que essa percentagem cresça para 14% até o ano de 2020 [1].

O aumento substancial com gastos energéticos para ICT remete a dois grandes aspectos do mundo contemporâneo. O primeiro é o fator econômico, e o segundo é o fator ambiental. No segundo, a maior parte da energia gerada no mundo se trata de uma energia não limpa (queima de combustíveis fósseis), o que contribui com a emissão de gases poluentes. A quantidade de energia gasta com infraestrutura de rede está em torno de 22 Giga Watts com uma média de crescimento de 12% ao ano [2]. Portanto, algoritmos que visam diminuir o consumo de energia, além de serem alvos de pesquisa acadêmica, geram impactos nos campos sociais, econômico e ambiental [3].

Segundo [4], as inovações tecnológicas desenvolvidas para as redes *backbones* são divididas em três grandes áreas:

- Criação de novos dispositivos eletrônicos mais econômicos e que mantenham ou superem o desempenho seus antecessores.
- Implementação de novos algoritmos que focam na redução de energia e ao mesmo tempo satisfaçam requisitos, como robustez e desempenho.
- Desenvolvimento de protocolos que visam acomodar o tráfego de rede, considerando como fator principal eficiência no consumo de energia.

Em redes sem fio, o problema de alocação de recursos é denominado como roteamento de alocação de comprimento de onda (*Routing and Wavelength Assignment* - RWA) enquanto que nas redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Networks*-EON), o problema recebe o nome de roteamento de alocação de espectro (*Routing and Spectrum Allocation* - RSA), onde um conjunto de *slots* é utilizado para suprir a demanda de tráfego [5, 6].

Em [7] foi definido que a distância de transmissão é o fator de maior peso na qualidade de transmissão (*Quality of Transmission* - QoT) quando se trata de redes de fibras ópticas elásticas. Utilizando esse conceito como base, a modulação a ser utilizada com QoT aceitável pode ser determinada em função da distância de transmissão. Entretanto, é importante ressaltar que maior distância de transmissão depende de alguns fatores, entre eles a relação sinal ruído óptico ou OSNR *Optical Signal-to-Noise Ratio* - OSNR, que é razão da potência entre o sinal desejado sobre o ruído que está sobreposto ao sinal estudado. Quando maior for a OSNR, menor é a interferência do ruído na transmissão.

Neste contexto, este trabalho procura encontrar soluções que permitam diminuir o consumo de energia em redes de telecomunicações. Para isso, foi desenvolvido e implementado novos algoritmos computacionais capazes de selecionar o menor consumo energético em redes ópticas, utilizando uma combinação de técnicas de modulação adaptativa, OSNR e código de correção de automáticos, também conhecido como *forward error correction*-FEC.

## 1.2 Objetivos

A proposta inicial deste trabalho era realizar a implementação de um único algoritmo utilizando técnicas de modulação adaptativa. Porém, a medida que o estudo foi evoluindo percebeu-se que era possível criar três algoritmos, a seguir:

- Atribuição de Espectro de Roteamento utilizando Modulação Adaptativa - ER-MA.
- Atribuição de roteamento com FEC adaptativo - FEC ADAPTATIVO.
- Técnica Híbrida em Redes ópticas Elásticas - ROE-TH.

Os Algoritmos são compostos, basicamente, de três etapas: na primeira são definidos os "k-menores" caminhos para cada conexão, baseando-se na distância entre o nó inicial e nó final. Nessa primeira etapa, seleciona-se qual a modulação será utilizada, no caso do ER-MA, ou qual FEC no caso do FEC ADAPTATIVO. Na segunda etapa, com a modulação e o FEC já estabelecidos, parte-se então para a realização do cálculo do consumo de energia. Por fim, na terceira etapa, o algoritmo realiza a escolha do caminho que apresenta menor consumo de energia.

Os Algoritmos foram projetados para que possam ser testado por diversas configurações de rede, visando permitir ao usuário uma flexibilidade em seus testes. Para a bateria de testes utilizadas neste trabalho, optou-se pela escolha de duas redes *backbones*.

- *Germany Network (GERMANY)*
- *USA Network (USA)*

Ambas as redes são amplamente utilizadas para fins acadêmicos.[8]

Os resultados foram mensurados em termos de números de conexões, consumo de energia e taxa de bloqueio, utilizando modulação fixa e adaptativa, e FEC fixo e adaptativo. Portanto, o objetivo geral do trabalho é demonstrar que o uso dessas técnicas adaptativas fornecem uma diminuição no consumo de energia se comparado a utilização de modulação e FEC fixos, sem que isso prejudique a qualidade de serviço.

## 1.3 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos e uma revisão do estado da arte. A primeira parte aborda conceitos gerais sobre redes de telecomunicações, topologias e classificações. Na segunda parte é apresentada a teoria de grafos, conceito como nós, arestas e algoritmos de caminhos mínimos. Por fim, será apresentado um estudo da teoria de modulação.

No Capítulo 3 é apresentado em detalhes todos os procedimentos e fórmulas necessárias para realizar o cálculo do consumo de energia em redes EON.

No Capítulo 4 é explicado em detalhes todos os três algoritmos desenvolvidos, o ambiente em que foi implementado, detalhamento dos testes e redes utilizadas e os resultados apresentados para cada uma das simulações.

No Capítulo 5 é descrito a conclusão do trabalho, indicando os principais resultados obtidos com os novos algoritmos propostos, e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Descrição Teórica

### 2.1 Considerações Iniciais

O tráfego de Internet acrescido à novas tecnologias de informação e comunicação apresentaram um crescimento exponencial [3]. Há diversas aplicações envolvendo multimídia, como: TV smarts de alta definição, computação em nuvem e aplicações em redes em tempo real. Essas aplicações levaram a necessidade de se pesquisar e desenvolver novos métodos de comunicação, visando suprir a crescente demanda dos usuários buscando manter e melhorar a qualidade de serviço [9].

Ao passo que a cobertura das tecnologias de informação e comunicação (TIC) se espalham, um aumento linear do consumo de energia ocorre, pois cada vez mais equipamentos e componentes são implantados anualmente [10]. A Figura 1 apresenta um gráfico que demonstra o crescimento do consumo de energia em redes de telecomunicações no período de nove anos. Nota-se que o consumo teve um acréscimo de mais 125 % entre os anos de 2009 à 2017.

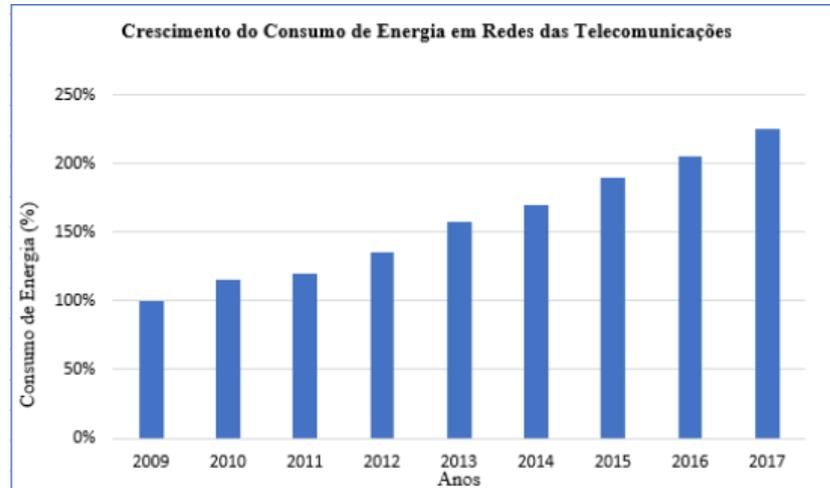


Figura 1 – Consumo de energia em redes de telecomunicações

[10]

Uma das formas de se diminuir esse consumo é utilizar o uso de sistemas de comunicação baseados na tecnologia da fibra óptica. O uso da fibra proporciona um ganho no transporte de informações 10.000 vezes maior, se for comparado com os sistemas de microondas [9]. Alinhado ao uso da fibra, é possível combinar a utilização de protocolos, como por exemplo, o WDM (*Wavelength-division Multiplexing*) ou protocolo de multiplexação por divisão de comprimento de ondas, que somado aos amplificadores ópticos, resultam na

diminuição do custo financeiro total e na amplificação da capacidade dos sistemas. Ainda neste contexto, em [5] afirma que a tecnologia WDM encontra dificuldades ao enfrentar o gradual aumento da demanda do tráfego de internet, devido ao fato que existem limitações físicas que impõem taxas fixas nos comprimentos de ondas.

Devido às limitações físicas, um novo tipo de rede foi desenvolvido, conhecido como rede óptica elástica (*Elastic Optical Network – EON*) [11]. Esta nova rede, tem a capacidade de flexibilizar a largura de banda e comprimento de onda, se ajustando conforme o atual estado do canal óptico e da demanda do usuário.

Em uma rede EON, no momento que um novo pedido de conexão é solicitado, leva-se em consideração o formato da modulação, o código de correção de erro (*Forward Error Correction - FEC*) e o espectro, resultando na solução mais inteligente. Essa decisão se baseia em comportamentos adaptativos que se ajustam conforme as condições reais do enlace [11].

A alocação de recursos de espectro em uma rede EON é definida com a atribuição de uma mesma quantidade de *slots* espectrais a uma rota encontrada [12]. Este problema é denominado de roteamento e alocação de espectro (*Routing and Spectrum Assignment - RSA*). Atualmente já existe uma evolução desse problema, o RMLSA (*Routing Modulation Level and Spectrum Allocation*), que adiciona a atribuição do formato de modulação ao espectro nas redes ópticas. Na literatura é possível encontrar uma alta gama de algoritmos propostos que focam em alocação de recursos em redes EON, o que demonstra a eficácia do novo paradigma e sua viabilidade [9, 11, 13, 14].

As redes EON possibilitam dividir os recursos espectrais em *slots* de frequência na forma de subportadoras. Sendo assim, é possível utilizar múltiplos formatos de modulação e taxas de dados e tamanhos variados de espectro [15]. Em suma, o objetivo da EON é alocar uma demanda a um determinado caminho óptico que possua uma largura de banda específica, com tamanho apropriado.

A tecnologia óptica de multiplexação por divisão de frequência ortogonais (*Optical Orthogonal frequency-division multiplexing O-OFDM*) permite a largura de banda do canal ser dividida em subportadoras que enviam dados independentes, por exemplo, a modulação Q-PSK com suas quatro subportadoras.

A arquitetura EON é composta por:

- **BVT**: Transmissores de largura de banda variável. Estes são responsáveis por alocar o espectro suficiente para acomodar cada demanda. Através da união de subportadoras OFDM formando um supercanal que transporta os dados sem banda de guarda no espectro. Os BVT's são responsáveis por gerar os caminhos ópticos, de acordo com a requisição atual, permitindo uma flexibilidade na largura de banda e a realocação dos recursos ópticos.[16]

- **BV-WXC**: Comutadores ópticos de banda variável. Possuem a função de criar o caminho óptico fim a fim, de acordo com a largura de banda determinada pelos BVT's. Logo, se há um aumento na capacidade tráfego de rede, os BV-WXC que forem acionados, amplificarão suas janelas de comutação, permitindo uma variação na taxa de transmissão naquele caminho [16].

Um dos principais desafios em uma rede EON é determinar quais são os recursos espectrais mínimos necessários e como alocá-los de forma dinâmica a um canal óptico com banda de guarda mínima. Outro conceito importante é o SNR, relação sinal ruído, (*Signal Nois-to-Ratio*) que indica o nível de impacto do ruído externo, ao sinal transmitido ao longo do percurso, que influencia diretamente no alcance óptico da conexão. Esse problema é de extrema relevância em ambientes dinâmicos, onde a conexão deve expandir/contrair sem afetar o tráfego [9].

## 2.2 Modulação Digital

Existem diversas técnicas para se modular digitalmente um sinal, ou seja, fazer com que ele transporte informações na forma digital. Nesse ponto é importante distinguir bem o que é demodulação de um sinal e o que é detecção de um sinal.

Demodular um sinal é remover a portadora. Detectar é o processo de se retirar a informação que um sinal modulado contém. A detecção pode ser de dois tipos: coerente e não coerente.

Na detecção coerente, o receptor usa a fase da portadora para detectar o sinal. Na detecção não coerente, a fase não é importante para detectar o sinal. Nessa técnica, o receptor pode ser menos complexo, mas sua performance é pior.

As principais técnicas de modulação digital usadas atualmente são:

- PSK - *Phase shift Keying* e
- QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*

### 2.2.1 Modulação Adaptativa

Em redes de telecomunicações, tratando-se de modulação fixa ou adaptativa, as mais utilizadas são as do tipo M-PSK (*Multi Frequency Shift Keying*) e as M-QAM (*M-ary Quadrature Amplitude Modulation*), conforme definido em [13, 15, 17, 18]. As modulações podem ser binárias, ou seja, dois símbolos são gerados no processo de modulação sendo que cada uma transporta um bit ou M-ária onde M símbolos são gerados, contendo  $\log_2 M$  bits.

Na Figura 2 estão representadas as constelações das modulações BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), QPSK (*Quadrature phase-shift keying*) e 16QAM.

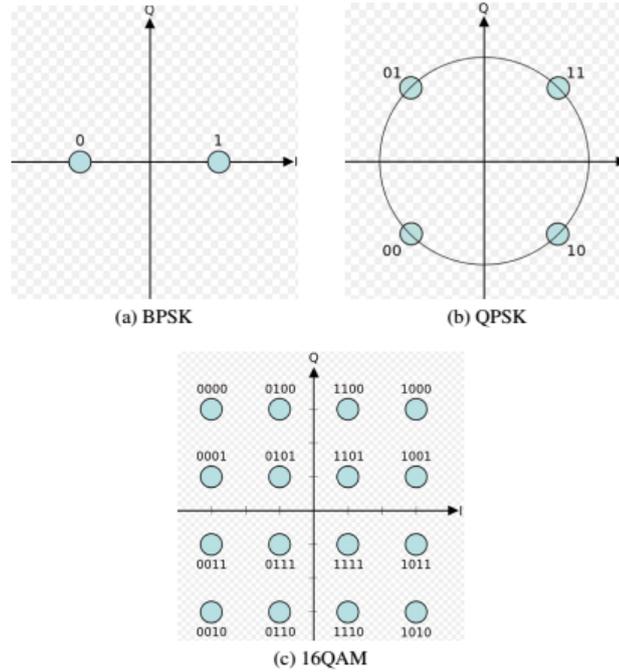


Figura 2 – Esquema de constelações das Modulações BPSK, QPSK e 16QAM [20]

Dois parâmetros são considerados de maior importância quando se analisa o desempenho das modulações digitais. A probabilidade de erro de bit (*Bit error rate* - BER) em função da relação sinal ruído (SNR) e a eficiência de largura de banda. Esta é definida como o número de bits transmitidos para cada 1 HZ de largura de faixa disponível no canal. Nas modulações M-PSK e M-QAM a probabilidade de erro de símbolo e a eficiência da largura de faixa aumenta com o valor de M. [19]

Em [20] a eficiência da largura de faixa para M-PSK e M-QAM é dada pela equação 2.1, a onde  $M$  é quantidade de símbolo por modulação, sendo  $M = 2$  para a modulação BPSK.

$$\varepsilon = \log_2 M (\text{bps}/\text{Hz}) \quad (2.1)$$

Na modulação BPSK *binary PSK*, a probabilidade de erro de símbolo e a probabilidade de erro de bit assumem o mesmo valor e como o canal apresenta ruído branco aditivo e gaussiano, e o uso de detecção coerente, a probabilidade de erro de bit é definido pela equação 2.2 [20].

$$P_{BPSK} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_o}}\right) \quad (2.2)$$

onde  $Q(x)$  é conhecido como função erro complementar expressada na equação 2.3,  $\mu$  é uma variável aleatória, e a relação  $\frac{E_b}{N_0}$  trata-se da correlação entre energia de bit e densidade de ruído, que está diretamente relacionada com a relação sinal ruído conforme apontado na equação 2.4 onde,  $B_w$  é largura de banda fixa do canal  $R$  é taxa de transmissão em bits por segundo [20].

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (2.3)$$

$$\frac{E_b}{N_0} = SNR \frac{B_w}{R} \quad (2.4)$$

Já no caso das modulações com  $M \geq 2$ , Q-PSK e 8-PSK considerando novamente o canal com ruído branco aditivo e gaussiano e detecção coerente, a probabilidade de erro de símbolo é dada pela equação 2.5

$$P_{MPSK} = 2Q \left( \sqrt{\frac{2E_s}{N_0}} \operatorname{sen} \frac{\pi}{M} \right) \quad (2.5)$$

onde  $E_s = E_b \log_2 M$  é a energia do símbolo.

Para as modulações M-QAM (16-QAM, 32QAM, 64QAM), o cálculo da probabilidade de erro de bit varia dependendo da constelação utilizada. Considerando a mais frequente constelação as retangulares em um cenário onde o canal apresenta ruído branco aditivo, a probabilidade de erro de bit é descrita pela equação 2.6.[20]

$$P_{MQAM} = 2 \left( \frac{1 - L^{-1}}{\log_2 L} \right) Q \left( \sqrt{\frac{3 \log_2 L}{L^{-1} - 1}} \frac{2E_b}{N_0} \right) \quad (2.6)$$

sendo  $L$  a raiz quadrada de  $M$ .

## 2.2.2 Código de Correção de Erro

Erros em sistemas de telecomunicações acontecem devido a ruídos, imperfeições do canal e eventuais interferências na recepção do sinal. A ocorrência de erros não é aceitável para grande parte das aplicações, surgindo assim a necessidade de utilizar ferramentas para detectar e corrigir quando os erros surgirem. Em suma, quando se trata de sinal de transmissão, temos: [18]:

- **FEC:** *Forward Error Correction*, onde a correção do erro é realizado no receptor.
- **ARQ:** *Automatic Repeat reQuest*, que, ao detectar um erro, o receptor solicita ao transmissor que reenvie o pacote recebido.

Neste trabalho, o método escolhido e analisado utiliza a primeira opção como forma de correção de erros. O motivo da escolha do método FEC é adequado, pois oferece um melhor desempenho em relação a ARQ, conforme demonstrado na pesquisa realizada sobre desempenho das técnicas de controle adaptativo em [18].

Os códigos de correção são divididos em dois grupos [18]: os códigos de bloco e os convolucionais. Neste trabalho, a opção escolhida para ser implementada foi a códigos de bloco, pois será utilizado o mesmo modelo de consumo de [8] e ao se utilizar código de bloco, quando uma mensagem é transmitida, ela é denominada como vetor de mensagens, formada por  $jbits$  de informação e são acrescentados  $n - jbits$  de paridade ou redundância, criando assim um bloco de  $nbits$  que é chamado de vetor código. Usualmente, a capacidade de correção automática de erro do código depende de uma taxa, que é estabelecida com relação ao número de bits de informação  $j$ , dividido pelo número total de bits,  $n$ .

Em comunicações óptica, o código FEC de baixa densidade de verificação de paridade *Low Density Parity Check* LDPC tem atraído bastante atenção nos últimos anos [21], pois códigos LPDC possibilitam um aumento no desempenho de sistemas em relação aos sistemas de correção de erros utilizados atualmente [22].

Os sistemas ópticos de comunicação passaram a incluir gradativamente a codificação de canal em suas tecnologias de transmissão, com o objetivo de alcançar taxas de erros pós-FEC entre  $10^{-12}$  e  $10^{-15}$ . A evolução do código FEC, basicamente, pode ser dividida em três gerações: a primeira geração surgiu em 1990 e aplicava código *Reed-Solomon*, com decisão abrupta e redundância em torno de 7% [23, 24]. A segunda geração, teve início a partir de 2000 e utilizava de combinações entre os códigos *Reed-Solomon*, BCH *Bose, Chaudhuri e Hocquenghem* e Hamming, onde a BER *Bit error rate* pré-FEC estava em torno de 3 a  $8 \times 10^{-3}$ . Finalmente, a terceira geração tem como característica principal a utilização de códigos iterativos e de decisão suave, como o código LDPC e turbo [24] que são marcados pela utilização de maiores porcentagens de redundância, geralmente de 25% e pelo incremento da BER pré-FEC requerida para números na ordem de  $10^{-2}$ .

É notório que houve uma evolução ao longo dessas gerações, permitindo um aumento no desempenho dos esquemas de codificação e na complexidade computacional dos codificadores e decodificadores. A Tabela 1 apresenta um resumo das características das gerações de códigos corretores de erro.

Tabela 1 – Gerações de códigos corretores de erro para sistemas ópticos [25]

Geração	Decisão	Tipos de Códigos	Limite de OSNR ( dB )	Overhead ( % )
Primeira	Abrupta	RS	14,5	6,69
Segunda	Abrupta	RS,BCH	12,6	13,34
Terceira	Suave	Turbo,LDPC	9,1	21,20

## 2.3 Grafos

Nesta seção, será descrita um pouco da teoria de grafos e como pode ser aplicado em redes de telecomunicações. Esta seção é de suma importância para o melhor entendimento dos Capítulos e dos algoritmos desenvolvimentos que são o foco dessa dissertação.

Um grafo é definido pelo par de conjuntos  $V$  e  $A$ , onde  $V$  é um conjunto não vazio de vértices ou nós e  $A$  é o conjunto de pares ordenados  $a = (v, w), v, w \in V$  [27]. A Figura 3 apresenta dois exemplos de grafos, onde (a) trata-se de um grafo não direcionado composto por 4 vértices ou nós: A,B,C,D, sendo que A conecta-se com B e B conecta-se A por uma aresta e B conecta-se com D e D conecta-se com B e assim por diante. Já em (b) temos um grafo direcionado ou dígrafo, a onde aresta além de conectar dois nós também possui uma direção associada, ou seja, na imagem B conecta-se com C porém C não se conecta com B como acontecia na Figura (a).

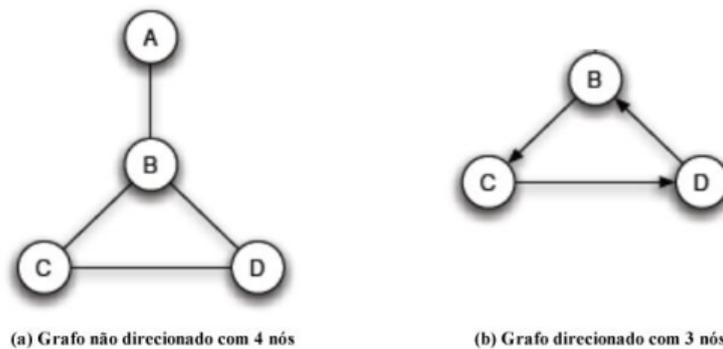


Figura 3 – (a) Grafo não direcionado,(b) grafo direcionado

[27]

A Figura 4 apresenta um uso real de como utilizar a teoria dos grafos para desmembrar uma rede de telecomunicações, e então representá-las em forma de nós e arestas. MIT, Harvard e Utah são os nós de grafo ligados por arestas dentro do mapa dos Estados Unidos em Arpanet. Na prática, cada nó representa um dos treze *hosts* ou hospedeiros disponíveis na época, ligados por arestas que são os enlaces de comunicação entre eles [26].

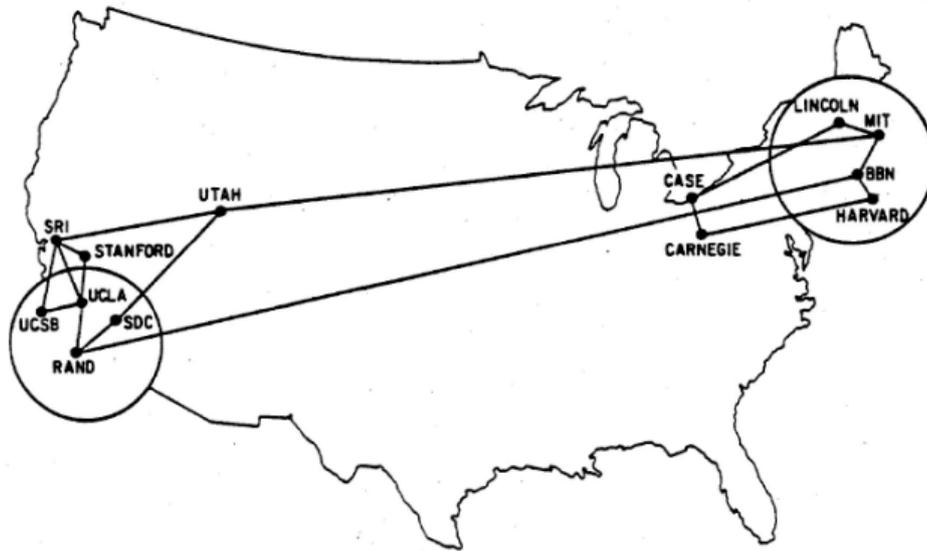


Figura 4 – Arpanet, exemplo de grafos em redes

[26]

Abstraindo o mapa americano de fundo e os *hosts* destacados no mapa, é possível visualizar uma representação bem similar a apresentada na Figura 3.

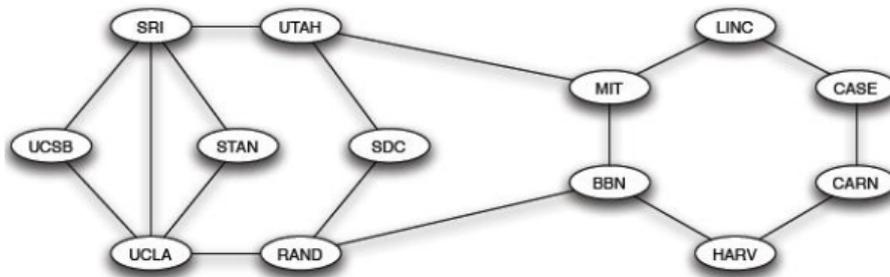


Figura 5 – Arpanet, grafo com abstrações

[26]

Caminhos ou *paths* são uma espécie de caminhada no qual se visita vértice a vértice, por exemplo, um estudante universitário no período de férias visitando diversos países e fazendo *check-in* em uma rede social. Supondo que este estudante inicia sua viagem no país X e finaliza também neste país, na teoria dos grafos, esse caminho é denominado como um ciclo. Porém nesse trabalho, são considerados apenas caminhos em que os nós não se repetem, ou seja, caminhos simples ou acíclicos [27].

Utilizando como base a Figura 5, um possível caminho para um enlace óptico seria:

- UCSB → UCLA → RAND → BBN → MIT

## 2.4 Redes Ópticas

As redes de telecomunicações atuais estão experimentando um aumento crescente na demanda por capacidade, originada principalmente pelo sucesso da Internet. Para suportar essa demanda, as redes de transporte estão sendo migradas para redes ópticas, pois estas podem prover essa demanda. Na evolução das redes ópticas, a tecnologia WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) que será explicado neste capítulo, fez avanços ao proporcionar a multiplexação por comprimento de onda, o que permite aumentar consideravelmente a capacidade de transmissão da fibra. A primeira seção apresenta um pouco da histórias das redes ópticas e as demais seções irão detalhar conceitos como características da redes ópticas, topologias e arquiteturas.

### 2.4.1 História das Redes Ópticas

Os sistemas de telecomunicações foram criados a partir do desenvolvimento e utilização de técnicas de comunicações elétricas e analógicas como o telefone. Com o emprego de cabos coaxiais, já no século XX, a capacidade dos sistemas telefônicos aumentou para 300 canais de voz, porém as perdas de frequência desses cabos eram maiores que 10MHz. [28]

Um sistema de comunicação utilizava dois parâmetros para medir a sua capacidade: distância e taxa de transmissão entre dois elementos quaisquer da rede [29]. A Figura 6, evidencia a evolução dos sistemas de comunicação de 1850, desde a invenção do telégrafo, até os anos 2000, utilizando a variável taxa de transmissão como a comparativo.

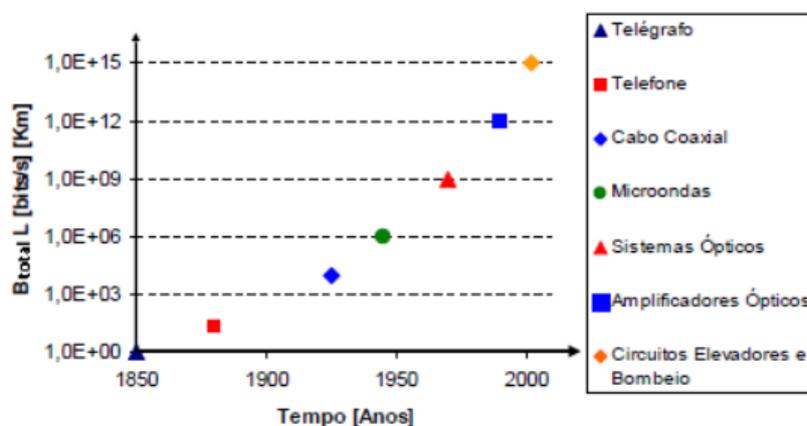


Figura 6 – Evolução do Sistemas de Comunicação

O primeiro sistema óptico foi apresentado em 1966, entretanto, a perda era tão significativa (cerca de 1000 dB/km) que inviabilizava qualquer tipo de uso. Em 1978, com a descoberta dos *lasers* e construção de novos detectores, o primeiro sistema óptico entrou em uso. Ele operava com taxas de 500Mbps e 100Mbps à distância de 10km. Este sistema foi chamado de primeira geração de sistemas ópticos e é abordado em [28].

No final da década de 80 ocorreu uma melhora no processo de fabricação das fibras ópticas, possibilitando atingir à distância de 50 Km. Com uma taxa de transmissão de 1,7Gbps e perdas de 0,5 dB/Km, ficou conhecida como a segunda geração de sistemas ópticos comerciais [28]. A terceira geração chegou em 1990 com um aumento na taxa de transmissão de 1,7Gbps para 2,4 Gbps e perdas abaixo de 2,5 dB/km [28].

Também, na década de 90, houve o surgimento do Amplificador a Fibra Dopada com Érbio denominado de EDFA que teve um grande impacto nas comunicações ópticas por acabar com a necessidade de converter os sinais ópticos para elétricos para amplificá-los. Além disso, o EDFA ajudou a reduzir os custos da rede, visto que o custo com equipamentos necessários para seu bom funcionamento reduziu consideravelmente [30].

Os avanços trazidos pelo EDFA, junto com o uso de novas técnicas de transmissão permitiu a criação de uma rede com 32 canais a uma taxa de transmissão de 5,2 Gbps e com quase 10 km de extensão [28].

Os desafios tecnológicos em redes ópticas consistem em aumentar a taxa de transmissão por canal óptico, multiplexação de uma quantidade de canais cada vez maior, e realizar a transmissão dos sinais a distâncias cada vez maiores com o objetivo de reduzir custos com equipamento e energia e conseguir uma cobertura cada vez maior.

## 2.4.2 Características das Redes Ópticas

Segundo [31], devido a suas características específicas, as fibras ópticas podem suportar o aumento exponencial do tráfego da internet citado no Capítulo 1, pois há:

- Enorme largura de banda: próxima de 50 Terabits por segundo, para fibras monomodo (*single-mode-fiber*), potencial aproximadamente três vezes maior de taxa de dados em meio eletrônico;
- Baixa atenuação do sinal: Menor do que 0,2 dB/km;
- Baixo consumo de energia;
- Pouco uso de material;
- Pouco espaço necessário;
- Baixo Custo.

Normalmente, a fibra é acessada por múltiplos usuários com uma taxa bem menor, o que pode reduzir as taxas de transmissão. Para realizar um melhor uso das redes ópticas, é necessário meios para tratar a concorrência de múltiplos usuários, por exemplo, a tecnologia de multiplexação por comprimento de onda WDM.

As fibras ópticas são utilizadas para transportar sinais digitais na forma de pulsos de luz modulados. Se comparado aos cabos coaxiais empregados nas faixas de micro-ondas, a fibra óptica é muito menor, possui um diâmetro de  $125\ \mu\text{m}$ . Com acréscimo de camadas de proteção, o diâmetro final varia em um intervalo de 0,4 mm a 1 mm. Outras vantagens que devem ser apontadas são: peso reduzido e maior flexibilidade mecânica [32]. A Figura 7 exemplifica uma modelo de fibra óptica.

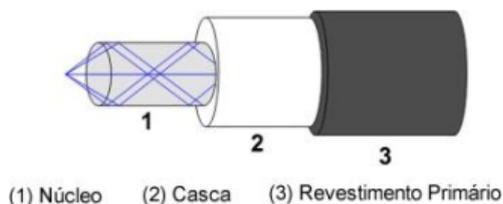


Figura 7 – Estrutura Interna Fibra óptica

[33]

Nos dias de hoje, as fibras ópticas são adotadas em todos os tipos de rede de telecomunicações e nos últimos anos houve um aumento na utilização de redes residências. Há duas gerações de redes ópticas: a primeira foi utilizada para prover uma maior capacidade de transmissão, com baixa taxa de erro de bit, sendo as demais funcionalidades eram realizadas por dispositivos eletrônicos. Alguns exemplos de redes dessa primeira geração são as SONET (*Synchronous optical network*) e a SDH (*Synchronous digital hierarchy*). [5]

A principal desvantagem das redes da primeira geração era a necessidade de um processamento eletrônico não só no nó origem e destino para uma determinada conexão, mas também nos nós intermediários que os dados passavam. Este, foi o motivo de pesquisas levarem a criação da segunda geração de redes ópticas. [28]

Na segunda geração das redes ópticas, a comutação, roteamento e a inteligência foram passadas para camada óptica. Esta evolução foi natural, pois as taxas de transmissão se tornaram cada vez maiores, ao ponto que, os dispositivos eletrônicos não conseguem processar dados no mesmo ritmo. Esse tipo de rede é conhecida como rede roteada por comprimento de onda e oferece caminhos ópticos para os seus usuários [5].

Em [5], caminhos ópticos são definidos como conexões entre dois nós que oferecem um comprimento de onda em cada enlace entre eles. Pode ou não haver conversão de

comprimento de onda entre um enlace e outro e o mesmo comprimento de onda pode ser utilizado em várias partes da rede contanto que não seja no mesmo enlace.

### 2.4.3 Topologias de Redes Ópticas

O enlace óptico é a unidade básica para todos os tipos de redes ópticas. As topologias de redes ópticas e interconexões são compostas por vários enlaces ópticos ponto a ponto.

A topologia de rede depende da extensão dos enlaces, dos multiplexadores e do hardware como *switches* e roteadores, podendo ser classificada como anel, árvore, malha ou combinações dessas opções. A classificação de uma rede óptica quanto a sua arquitetura, varia de acordo com extensão da área ocupada, sub-redes e interconexões entre elas. Conforme apresentados em [34], as redes ópticas podem ser classificadas como:

- Redes ópticas *long-haul* ou *backbone*;
- Redes ópticas Regional/metro;
- Redes ópticas de acesso.

A figura 8 trás uma visão abrangente da arquitetura das redes ópticas:

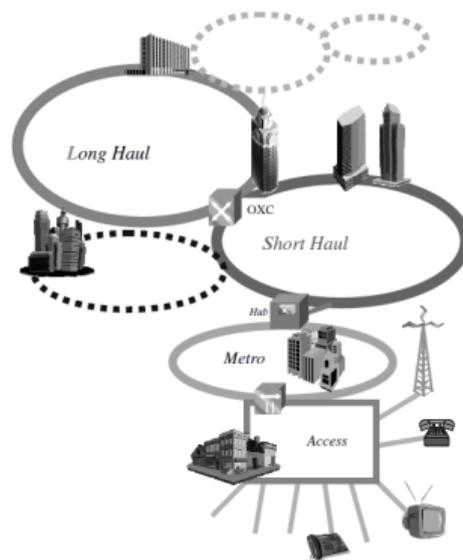


Figura 8 – Visão geral da arquitetura de redes ópticas

[34]

As redes ópticas de acesso normalmente possuem de 1 a 10km de extensão e usam uma enorme variedade de tecnologias e protocolos para fornecer conectividade aos clientes. Redes Metro ou Regional possuem extensões entre 10 km e 500km [35] e por fim, redes *backbones* ou *long-haul* são de escala global, ou pelos menos maiores que as regionais, portanto, o tamanho mínimo é de 500km.

### 2.4.4 Arquitetura de Redes Ópticas

Em [5] é apresentado a Figura 9, que demonstra a arquitetura de uma rede óptica WDM da segunda geração. Normalmente, este tipo de rede provê caminhos ópticos aos seus usuários, que geralmente são roteadores IP ou terminais SONET. Nesta imagem estão presentes 6 caminhos ópticos diferentes: A-B,B-C,E-F(1),E-F(2),E-F(3),por exemplo, o caminho A-F utiliza  $\lambda_2$ .

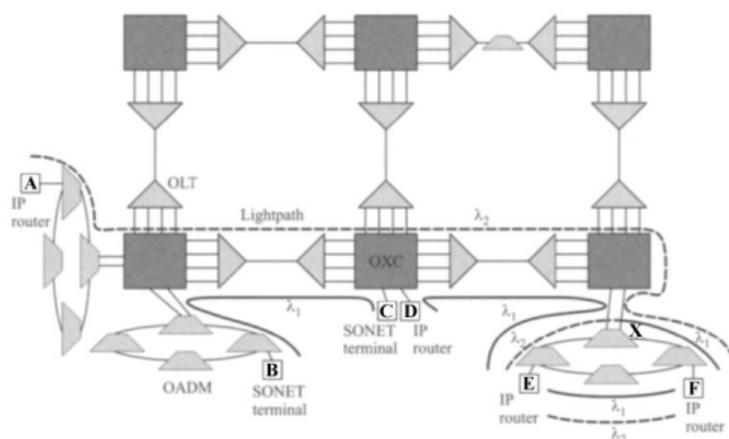


Figura 9 – Arquitetura de uma rede óptica, com OLTs, OADMs e OXCs

[5]

B-C,D-E e E-F(1) não dividem nenhum enlace, logo, podem usar o mesmo comprimento de onda  $\lambda_1$ , já A-F e B-C dividem o mesmo enlace, devem utilizar comprimento de ondas diferentes.

Os elementos-chave das redes ópticas, mostrados na Figura 9, são os terminais de linhas ópticas (OLT - *Optical line terminal*), multiplexadores ópticos *add/drop* (OADM) *Optical add/drop multiplexers* e o *Optical crossconnect* (OXC).

Um OLT multiplexa vários comprimentos de onda em uma única fibra e também a demultiplexação de um conjunto de comprimentos de onda de uma fibra em várias outras fibras [5]. As OLTs são utilizadas como terminais de uma conexão ponto a ponto em um enlace WDM. O OADM tem por objetivo retirar ou adicionar informações em um comprimento de onda específico nos sinais que passam por ele.

Quando os nós são conectados por fibras de maneira a formar um grafo arbitrário é necessário um dispositivo para rotear os sinais de entrada para a saída desejada. Esse dispositivo é denominado OXC (*Optical crossconnect*) e, assim como os OADM, podem ou não fazer a conversão de comprimento de onda. A Figura 10 mostra o funcionamento de um OXC, onde os sinais de um determinado comprimento de onda ( $\lambda_1$ , por exemplo), chegam em uma fibra M e saem por outra [34]. O OXC tem uma função parecida com

o OADM, mas em tamanhos maiores por ter dezenas a milhares de portas, enquanto o OADM tem somente duas. Além disso, o OXC tem a capacidade de trocar comprimentos de onda de uma porta para outra.

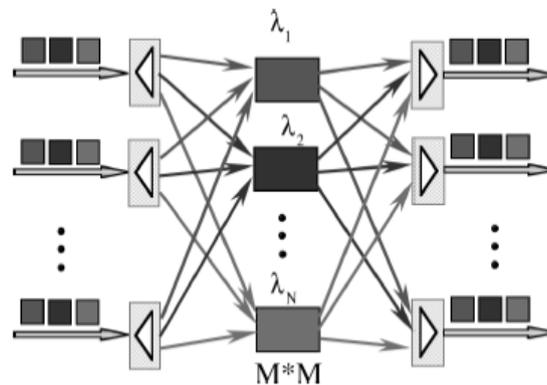


Figura 10 – OXC de tamanho  $N \times M$  ( $N$  = número de comprimentos de onda,  $M$  = número de fibras de entrada/saída

[34]

#### 2.4.5 Técnicas de Multiplexação

Transmitir dados a uma taxa de bits alta em uma única fibra óptica é mais econômico do que transmitir a uma taxa menor em várias fibras. Por isto, há a necessidade da multiplexação dos sinais. A Figura 11, exibe duas maneiras possíveis de realizar a multiplexação dos sinais. Ambas as técnicas apresentadas utilizam  $N$  sinais de entrada, cada uma com  $B$  [bps] multiplexam em uma única fibra, com uma taxa de  $NB$  b/s.

Na primeira técnica, conhecida como Multiplexação por Divisão de Tempo (TDM), a onde muitos sinais de baixa velocidade são intercalados pelo multiplexador para formar um único sinal de alta velocidade, por exemplo, intercalando o primeiro byte do sinal 1 com o primeiro byte do sinal 2 e assim sucessivamente. Como exemplo dessa técnica, um multiplexador usando a técnica TDM poderia multiplexar 64 sinais de 155Mb/s em um único sinal de 10Gb/s. Há algumas formas de fazer essa multiplexação com sinal óptico, sem conversão eletrônica e elas são chamadas de Multiplexação por divisão de tempo óptica (OTDM - *Optical time division multiplexing*)[36]

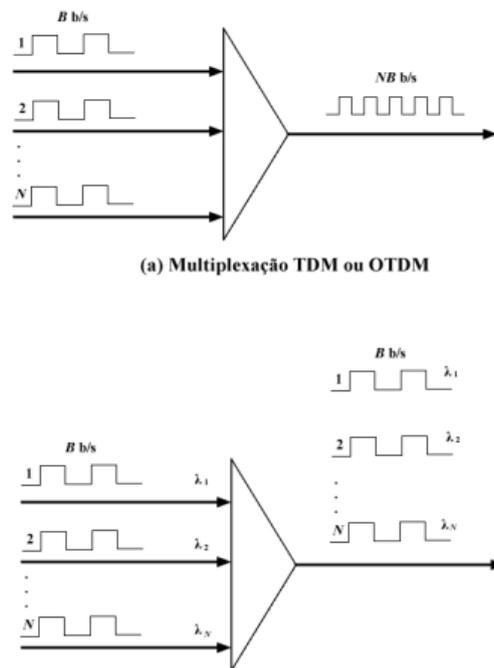


Figura 11 – (a) Multiplexação por TDM e (b) WDM

[5]

O segundo modo de aumentar a capacidade da fibra, proposto em 11.b, é chamado de Multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM - *Wavelength division multiplexing*). WDM usa a mesma ideia da Multiplexação por divisão de frequência (FDM - *frequency division multiplexing*), que vem sendo utilizada em sistemas de rádio há mais de um século, no contexto das redes ópticas. Nela os sinais são transmitidos simultaneamente em comprimentos de onda diferentes na fibra óptica. Na prática, é como se houvessem várias fibras “virtuais” em uma mesma fibra, cada uma carregando uma informação diferente. Como esta técnica será utilizada neste trabalho, na próxima ela será descrita de maneira mais detalhada.

As técnicas TDM e WDM são diferentes maneiras de aumentar a capacidade de transmissão, e, nas redes atuais, são utilizadas em conjunto para atingir um desempenho ainda melhor. Combinando essas técnicas é possível chegar até 1Tb/s em uma única fibra, o que permite a criação de redes com maior capacidade e que alcancem distâncias maiores.

## 2.4.6 Tecnologia WDM

WDM é uma tecnologia para multiplexação de comprimentos de onda em redes ópticas. O objetivo desta tecnologia é prover concorrência necessária para explorar a alta largura de banda disponível, permitindo assim, transmitir várias informações simultaneamente utilizando diferentes comprimentos de onda [37].

Cada comprimento de onda opera com uma velocidade de processamento eletrônico diferente, que permite um fluxo de informação bem maior, multiplicando a quantidade de canais disponíveis pela velocidade de cada um deles. Por exemplo, uma fibra suporta 160 canais de comunicações a 40 Gbps cada um, resultando no total de 6,4 Tbps ( $160 \times 40 \text{ Gbps}$ ).

A Figura 12 é uma representação esquemática de um enlace WDM ponto a ponto.

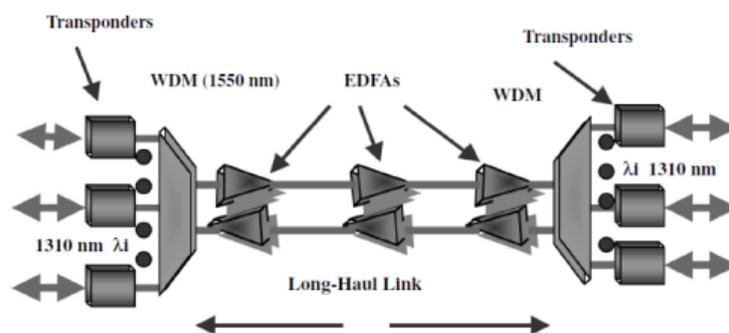


Figura 12 – Representação de um enlace WDM

[33]

Nesse esquema, o enlace de um ou mais comprimentos de onda é atribuído, multiplexado, amplificado e transportado através de duas fibras para o fluxo do tráfego, uma para subida de dados e outra para descida. Os transponders são responsáveis por preparar o sinal que chega nos enlaces para serem multiplicados em comprimentos de onda diferentes. O EDFA (*Erbium-Doped Fiber Amplifiers*) tem a função de amplificar o sinal óptico antes de lançá-lo para transporte. Normalmente, é necessário um EDFA a cada 80 a 120 km. Na outra ponta acontece o procedimento inverso, com o transponders realizando a conversão.

O uso de comprimento de onda para rotear dados é conhecido como roteamento de comprimento de onda, e a rede que utiliza essa técnica é chamado de rede como roteamento por comprimento de onda. Além dos componentes citados, a rede é composta de *switches* ou roteadores de comprimento de ondas interconectadas utilizando fibra óptica.

Os multiplexadores OADM (*Optical Add Drop Multiplexer*) ou WADM (*Wavelength Add Drop Multiplexer*), que são componentes responsáveis por colocar e remover comprimentos de onda de uma fibra óptica. Na Figura 13, é apresentado o uso desses componentes em enlace de comunicação óptico ponto a ponto.

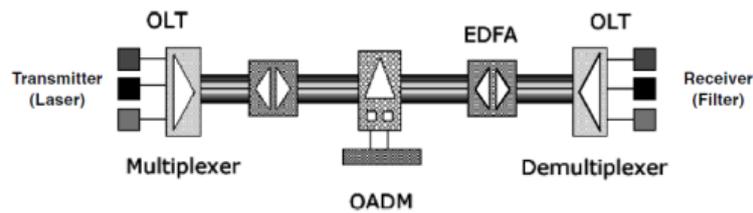


Figura 13 – Uso de OADM em um enlace ponto a ponto

[35]

O OLT (*Optical Line Terminator*) é responsável por converter sinais eletrônicos em sinais ópticos da fonte ao destino [34]. A vantagem das Redes WDM é permitir o uso de conexões cruzadas, que roteiam os caminhos ópticos da fonte ao destino e a flexibilidade permitida pelo roteamento de comprimento de onda e processamento da rede.

#### 2.4.7 Roteamento e atribuição de comprimento de onda

No roteamento e atribuição de comprimento de onda RWA (*Routing and Wavelength Assignment*), em uma rede roteada por comprimento de onda, os usuários se comunicam através de canais WDM. Esses canais são utilizados para suportar uma determinada conexão e podem alcançar vários enlaces de fibra.

A Figura 14, é um exemplo de como são feitas as conexões em uma caminho óptico. Por exemplo, a conexão com nó origem CO para nó destino NJ atravessa os seguintes enlaces físicos: CO-TX, TX-GA, GA-PA, PA-NJ.

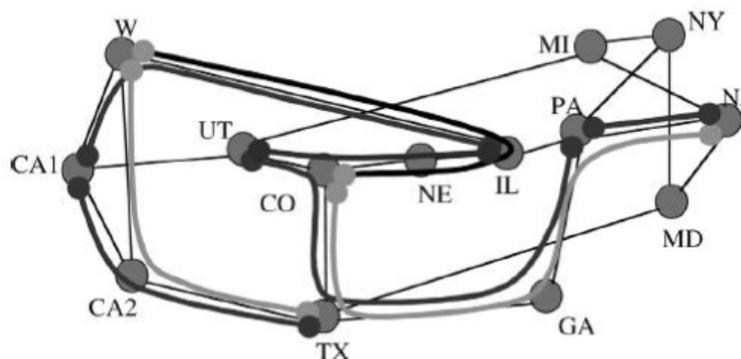


Figura 14 – Conexões em caminhos ópticos de rede WDM

[34]

O ato de decidir quais serão os caminhos ópticos roteados para uma determinada conexão é denominado RWA [5]. O tráfego utilizado nas pesquisas da área pode ser:

- **Estático:** Quando todas as requisições de conexão são previamente conhecidas.
- **Dinâmico:** As conexões chegam em uma determinada ordem e os caminhos ópticos devem ser estabelecidos de acordo com a chegada.

O problema de RWA normalmente é dividido em dois subproblemas: seleção ou escolha dos caminhos e atribuição do comprimento de onda.

A seleção de caminho pode ser feita através de um roteamento estático ou dinâmico. Para determinar qual será o caminho escolhido, na literatura alguns algoritmos são propostos:

- **Menor caminho:** Encontra o menor caminho entre nó origem e destino para uma determina conexão
- **k-Menores caminhos:** São selecionados os K possíveis caminhos para solução do problema
- **Roteamento adaptativo:** a rota é escolhida de acordo com estado atual da rede, dinamicamente.

A atribuição do comprimento de onda tem como função selecionar um dos possíveis comprimentos de onda disponíveis na rede. As principais utilizadas são:

- **Aleatório:** o comprimento de onda é definido aleatoriamente dentre todos os possíveis.
- **Mais utilizado:** Atribui o comprimento de onda mais utilizado da rede, com o objetivo de deixar o restante para demandas futuras.
- **Menos utilizado:** Escolhe o comprimento de onda que tem a maior disponibilidade.
- **Primeira atribuição:** Os comprimentos de onda são definidos em ordem numérica e o primeiro que tiver disponível será escolhido.

A função objetivo do problema é a minimização da taxa de bloqueio ou maximização do número de conexões aceitas. A minimização do comprimento de onda é solucionada em [38]. Neste caso, assume-se que todas as conexões suportadas pela rede usam o menor número possível de comprimento de onda, preservando para futuros usos.

Novas soluções foram demonstradas em [39], nesse caso o objetivo era conseguir balancear a carga da rede, distribuindo o tráfego proporcional entre fibras presentes.

No próximo capítulo será abordado o modelo de consumo em Redes ópticas e todas os calculos necessários para se extrair qual o consumo de um determinado caminho óptico.

## 3 Modelo de Consumo de Energia em Redes Ópticas Elásticas

### 3.1 Considerações iniciais

Neste Capítulo são apresentados os conceitos necessários sobre o consumo e como é calculado o consumo de energia elétrica em redes de fibra óptica. De forma a deixar mais claro o entendimento, na Figura 15 é apresentado um digrama de blocos que exhibe um aglomerado de componentes apresentados em [8]:

- Transmissor;
- Enlaces de fibra óptica, com amplificadores ópticos;
- BV-OXC's;
- Receptor.

Importante frisar que, esse digrama de blocos não é estacionário, podendo variar de acordo com as especificações dos sistemas, taxas de bits, taxa de código e distância entre nós.

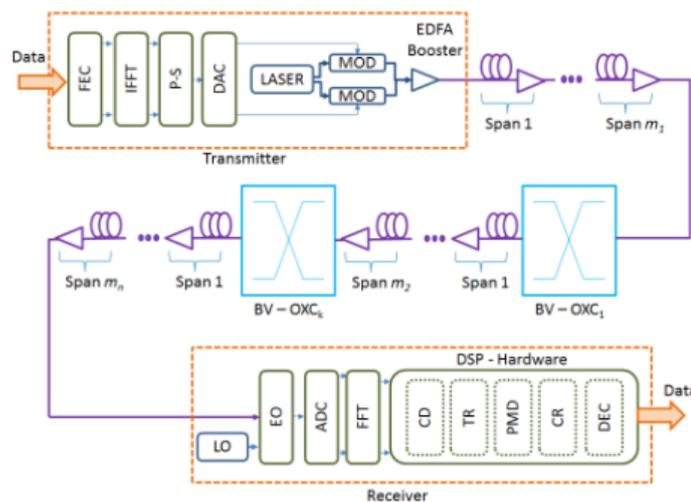


Figura 15 – Digrama de Blocos dos sistemas de transmissão baseado em OFDM

[8]

No transmissor OFDM, para cada requisição de conexão o fluxo de alta taxa de bit é codificado na entrada com um tipo de código FEC podendo ser RS ou LDPC. Nesta

dissertação os dois tipos de códigos serão utilizados, sendo o critério de escolha o valor do OSNR do caminho óptico.

## 3.2 Determinando a modulação e o Código FEC em Redes de Fibra Óptica

No âmbito das redes de fibra óptica, a qualidade de transmissão ou *Quality of Transmission*(QOT) do sinal é fortemente impactada por várias limitações de camada física. Dentre essas limitações podem-se destacar [40]:

- A emissão espontânea amplificada (*amplified spontaneous emission*-ASE);
- Dispersão de modo polarizado (*Polarization Mode Dispersion* - PMD);
- Dispersão cromática (*Chromatic Dispersion* - CD);
- Cabeamento estruturado, *crosstalk* - XT ou diafonia é a interferência indesejada que um canal de transmissão causa em outro;
- Modulação de auto-fase (*self-phase modulation* - SPM);
- Modulação de fase cruzada (*cross-phase modulation*-XPM);
- E a mistura de quatro ondas (*four-wave mixing* - FWD).

O modelo utilizado como base para criação do algoritmo considera a perda na transmissão de fibras ópticas, e limites de OSNR, com uma margem adicional de 3 dB de largura de banda.

A Equação 3.1 determina a distância máxima alçada por modulação, onde  $B_r$  denota a taxa de transmissão e  $D_{max}$  a distância máxima em metros apresentada em [8], dessa forma, para cada requisição de conexão, a modulação apropriada será escolhida por meio da equação 3.1. Na Figura 16 é graficamente visualizado que o alcance da taxa de transmissão diminui a medida que a taxa de bits aumentada, isto indica que quanto maior o alcance da transmissão, maior é o impacto das limitações físicas da rede.

$$D_{max} = \frac{1}{2}[-804, 3 * \ln(B_w) + 5584, 6] \quad (3.1)$$

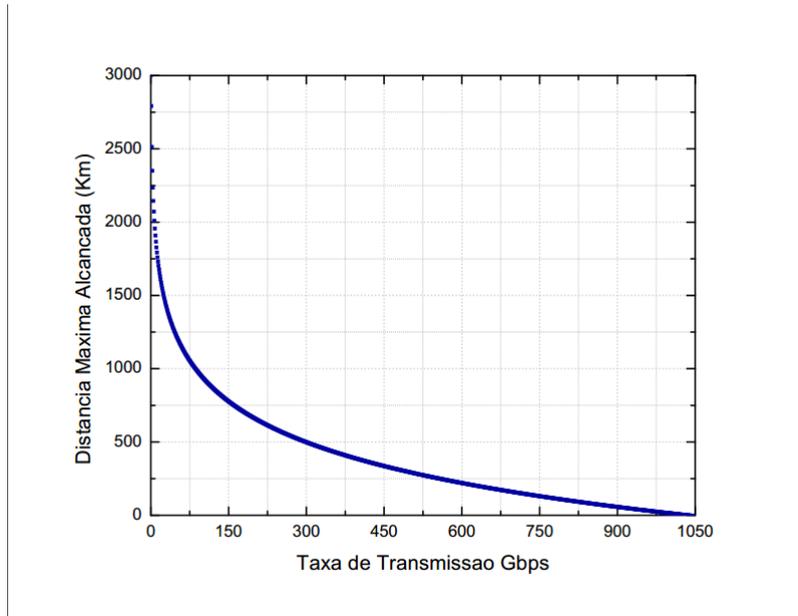


Figura 16 – Alcance da transmissão versus taxa de bits

Já na relação entre a taxa de modulação e a distância de transmissão BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM, nota-se que à medida que aumenta o número de símbolos por bit no esquema de constelação, a distância de transmissão diminui, ou seja, quanto mais complexa as modulações, maior será a quantidade de informações transmitidas. Logo, é necessário a diminuição da distância de transmissão para garantir um QOT.

Dentre as opções de PSK, a mais simples é a BPSK. Entretanto, é a que oferece o maior alcance de distância de transmissão devido à sua alta capacidade de resistir ao ruído. Hoje, QPSK é extensivamente aplicada em sistemas de comunicação para eficiência de alto espectro e robusta capacidade anti-interferência. As modulações 16QAM, 32QAM e 64QAM são continuamente utilizadas em sistemas de transmissão que trabalham com alta taxa de bits.

O número de frequências contínuas (*slots*) em cada caminho óptico é obtido através da equação 3.2.  $B_{w_i}$  é a largura de banda requerida pelo caminho óptico expressada em GHz,  $\varepsilon_{mod}$  é a eficiência espectral dada por b/s/Hz e  $S_{slot}$  é a largura de um *slot* em GHz [8].

$$N_{slot} = \left\lceil \frac{B_{w_i}}{\varepsilon_{mod} \cdot S_{slot}} \right\rceil \quad (3.2)$$

A Figura 17 apresenta graficamente o comportamento do número de *slots* em função da largura de banda requerida no enlace óptico considerando uma variação de 10 até 1000 GHz com uma curva para cada modulação que será utilizada nessa dissertação. Nota-se que número de o *slots* disponíveis aumenta de forma proporcional à largura de banda requerida.

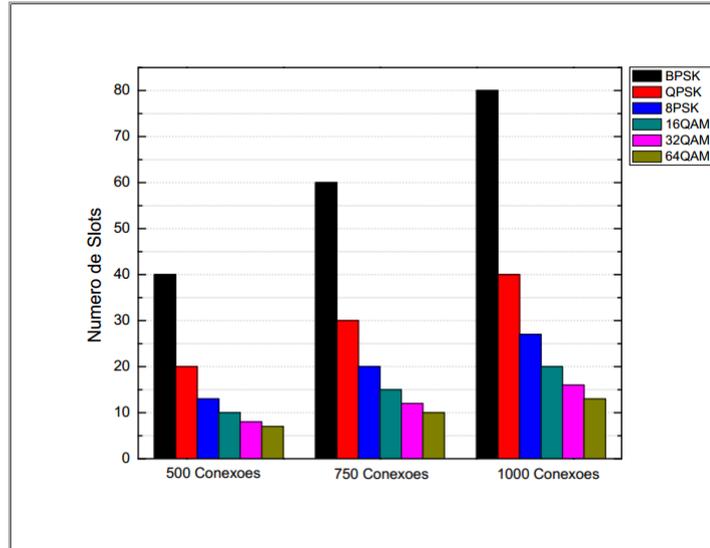


Figura 17 – Largura de Banda requerida Versus Número de Slots

Na Tabela 2, o *Maximum Transmission Distance* (MTD) é calculado pela equação 3.1, considerando uma  $B_w$  de 500 GHz. Percebe-se que as modulações mais simples possuem uma quantidade maior de números de slots e a MTD alta, que vai diminuindo à medida que aumenta a complexidade da modulação [8].

Tabela 2 – Relação do desempenho de cada modulação em termos de eficiência espectral, número de slots e MTD [25]

Modulação	Eficiência Espectral	Números de Slots	MTD (Km)
BPSK	1	40	1776
QPSK	2	20	1219
8PSK	3	14	893
16QAM	4	10	662
32QAM	5	8	483
64QAM	6	7	336

O cálculo do tipo de FEC que será utilizado está atrelado ao valor-base do OSNR do caminho óptico escolhido. Em [8] são apresentadas as fórmulas necessárias para realizar o cálculo da OSNR que servirá de parâmetro para determinar qual será o código FEC escolhido pelo algoritmo. Na Equação 3.3 é determinado que o valor de OSNR total é igual a soma dos OSNR em cada caminho óptico utilizado.

$$\frac{1}{OSNR_{total}} = \sum_1^s \frac{1}{OSNR_s} \quad (3.3)$$

O uso de modulação adaptativa e FEC adaptativo visam a redução do consumo de energia que é o objetivo principal dos algoritmos desenvolvido nesta dissertação. Em suma para esta seção é bom salientar que formato da modulação é determinando de acordo

com a distância entre os nós origem e destino do campinho óptico e o código FEC será determinado de acordo co nível de OSNR presente no caminho escolhido.

### 3.3 Consumo de energia em redes ópticas elásticas

Nesta seção será apresentado de forma detalhada como realizar o cálculo de energia nos principais componentes que compõe uma rede óptica. O consumo de energia é calculado com base consumo de cada um dos blocos da Figura 15. São eles: transmissão, comutação, encaminhamento e recepção, o consumo energético de um caminho  $i$  pode ser obtido através equação 3.4

$$P_{Optical_i} = P_{TX_i} + P_{RX_i} + \sum_{q=1}^Q P_{EFDA(q)_i} + \sum_{r=1}^R P_{BV-OXC(r)_i} + \sum_{r=1}^R P_{control_i} \quad (3.4)$$

Onde  $P_{TX_i}$  e  $P_{RX_i}$  representam o gasto energético do transmissor e receptor respectivamente,  $P_{EFDA(q)_i}$  é o consumo de energia dos  $q$  amplificadores EDFA's no caminho óptico escolhido,  $P_{BV-OXC(r)_i}$  representa os consumos dos  $r$  comutadores contidos no caminho óptico e finalmente  $P_{control_i}$  trata-se do consumo de energia do plano de controle [8].

#### 3.3.1 Consumo de Energia do Transmissor

A Equação 3.5, determina qual é o gasto energético de um transmissor, que a soma do gasto das operações que o compõe. O  $E_{FEC}$  é consumo de energia do código FEC,  $E_{P-S}$  a energia consumida na conversão em paralelo a série posterior a codificação, o consumo de energia DAC e dado por  $E_{DAC}$ , por fim o gasto do modulador é determinado como  $E_{MOD}$ . Além dos já citados, ainda temos variáveis como  $\eta_{eo}$  que é a eficiência de conversão de energia eletro-óptica,  $P_{CW}$  é a potência de saída de uma onda contínua, e  $\eta_T$  é a eficiência do transpônder.

$$P_{TX_i} = \frac{R_i}{\eta_{eo}} (E_{FEC} + E_{P-S} + E_{DAC} + E_{MOD}) + \frac{\eta_t R_i}{2} + P_{CW} \quad (3.5)$$

O valor do gasto energético do código FEC variará de acordo com tipo utilizado. Em [41] e [42] são apresentados as equações 3.6 e 3.7 que determinam com exatidão o valor gasto para os dois tipos de modulações. Na equação 3.6 temos  $l$  é o comprimento do código,  $k$  o número de bits de informação por bloco de código,  $c_g$  é razão média da matriz de gerador de uns por coluna,  $E_{op}^G$  e  $E_{op}^R$  é energia média por operações e porta de acesso ao registrador.

$$E_{LDPC}^{en}(lk) = \frac{[(l-k)(kc_g - 1)E_{op}^G] + lE_{op}^R}{k} \quad (3.6)$$

$$E_{RS}(n, k) = \left( E_{RS}^{en} + \frac{E_{RS}^{dec}}{(1 - P_b)^{L+h_s}} \right) + \left[ \frac{b_a}{n_c(n-2t)m} \right] \times \left[ n_c(n-2t)m + \left\lceil \frac{h}{(n-2t)m} \right\rceil + (n-2t)m \right] \quad (3.7)$$

A equação 3.7 é composta das variáveis  $n$ , que é o número total de símbolos do código de blocos codificados,  $L$  é o tamanho da carga útil,  $h_s$  é o tamanho do cabeçalho,  $B_a$  é o tamanho do mensagem transmitido,  $n_c = \frac{L}{km}$ ,  $2t = n - k$  e, por fim,  $m = \log_2(n+1)$ . Já o parâmetro  $E_{RS}^{en}$  é obtido através da equação 3.8 [42].

$$E_{RS}^{en} = \frac{927t + 657}{n - 2t} \quad (3.8)$$

$E_{RS}^{dec}$  determinado pela equação 3.9 determina o consumo energético para decodificar o código RS.

$$E_{RS}^{dec} = \frac{995t - 2697}{n - 2t} + [1 - (1 - p_b)^{mn}] \frac{104t^2 + 2574t + 11730}{n - 2t} \quad (3.9)$$

Finalmente os demais componentes que compõe a equação 3.4 são determinados através das equações, 3.10, 3.11, 3.12.

$$E_{DAC} = \frac{F_D n_d F_s}{R_i} \quad (3.10)$$

$$E_{MOD} = \frac{8V_{cc} V_{pp}}{R_t R_i} \quad (3.11)$$

$$P_{CW} = I_i \cdot 10^{\frac{L_{mod}}{10}} \quad (3.12)$$

Sendo:

- $F_{DD}$ , a figura de mérito do DAC.
- $n_d$  é a resolução do DAC.
- $F_s$  é a frequência de amostragem.
- $V_{cc}$  é a tensão de alimentação do condutor do modulador
- $V_{pp}$  é a tensão de oscilação do pico a pico do modulador.
- $R_T$  é a resistência de terminação do condutor.
- $I_i$  é a potência de lançamento de entrada para o caminho  $i$ .
- $L_{mod}$  é a perda de excesso óptico MZM.

### 3.3.2 Consumo de Energia do Receptor

O consumo de energia do Receptor  $P_{RX_i}$  é determinado pela equação 3.13.[8]

$$P_{RX_i} = \frac{R_i}{\eta_{eo}}(E_{LO} + E_{OE} + E_{TIA} + E_{ADC} + E_{DSP}) \quad (3.13)$$

Com  $E_{LO}$ , representando o consumo de energia do oscilador local,  $E_{OE}$  é o consumo de energia do conversor elétrico óptico,  $E_{TIA}$  é o amplificador de trans-impedância,  $E_{ADC}$  representa o consumo de energia do conversor analógico/digital e  $E_{DSP}$  é o consumo de energia DSP. Através das equações 3.14,3.15,3.16,3.17 são obtidos todos os valores necessários para o cálculo de energia no receptor.

$$E_{OE} = \frac{15\Re V_{bias} P_{rec}}{\varepsilon F_s} \quad (3.14)$$

$$E_{TIA} = \frac{1.88}{R_i C_{LDPC} \log_2 M} \quad (3.15)$$

$$E_{ADC} = \frac{4F_D n_{ADC} F_s}{R_i} \quad (3.16)$$

$$E_{DPS} = E_{CD} + E_{TR} + E_{PMD} + E_{CR} + E_{DEC} \quad (3.17)$$

a onde temos:

- $\Re$  a responsividade do fotodiodo
- $V_{bias}$  a tensão de polarização do fotodiodo
- $P_{rec}$  é a potência recebida
- $C_{LDPC}$  é taxa e código
- $M$ , o tamanho da constelação
- $n_{ADC}$  é resolução do ADC
- $E_{CD}$  é o consumo de energia para compensação CD
- $E_{TR}$  é consumo de energia para TR
- $E_{PMD}$  é o consumo de energia da compensação PMD
- $E_{CR}$  é consumo de energia para CR
- $E_{DEC}$  é consumo de energia para decodificação

### 3.3.3 Consumo de energia no Amplificador EDFA

Para realizar o cálculo do gasto energético dos amplificadores nos caminho óptico utiliza-se a equação 3.18

$$P_{EDFA_i} = \frac{P_{in}(G_{amp}(\omega))}{\eta_E \eta_{PCE}} \quad (3.18)$$

sendo  $P_{in}$ , a potência de entrada do amplificador,  $\eta_E$  é a eficiência de conversão do circuito de controle e gerenciamento do amplificador,  $\eta_{PCE}$  é a eficiência de conversão de potência do amplificador. Já o ganho espectral  $G_{AMP}$  pode ser fragmentado na equação 3.19.

$$G_{amp}(\omega) = \frac{G_0(\omega)}{1 + \frac{P_{out}}{P_{sat}}} \quad (3.19)$$

onde:

- $G_0(\omega)$ , o ganho espectral não saturado do amplificador.
- $P_{out}$  a potência na saída do amplificador.
- $P_{sat}$  a potência óptica de saturação.

Neste trabalho, os BV-OXC independem do formato de modulação e do tipo de código FEC utilizado. Portanto, optou-se considerar um valor fixo, e portanto, pois, conforme [4] gastos fixos não são objetos de interesse para foco em redução de gasto de energia em redes de fibra óptica.

## 3.4 Considerações finais

Neste Capítulo foi apresentado as diversas equações necessárias para se realizar o cálculo do consumo de energia fim a fim de uma conexão. As constantes apresentadas nesta seção estão dispostas no Anexos A e B.

No próximo capítulo, os conceitos evidenciados no capítulo 3 serão utilizados pelos algoritmos propostos para realizar o consumo total de  $n$  conexões escolhidas pelo usuário e assim determinar qual decisão tomará.

## 4 Algoritmos e Resultados

Neste Capítulo, serão detalhados os três algoritmos desenvolvidos e os resultados obtidos em cada um deles. O objetivo é a redução do consumo de energia em redes de fibra óptica, utilizando técnicas de modulação adaptativa e alocação de espectro. O primeiro algoritmo ER-MA, foi construído utilizando somente o conceito de modulação adaptativa, onde o critério de escolha da modulação foi realizado em função da distância máxima alcançada. O segundo FEC ADAPTATIVO, foi implementado com o foco em determinar qual código seria utilizado para cada conexão. O critério utilizado foi o intervalo de Relação Sinal Ruído do caminho óptico. É importante ressaltar que nesse algoritmo foi utilizado a modulação fixa de BPSK. O terceiro algoritmo é denominado ROE-HT, no qual aplica uma técnica híbrida que utiliza os conceitos dos dois primeiros algoritmos combinados. Todos os três algoritmos foram projetos e implementados, visando a diminuição do gasto energético preservando sempre QoT e QoS.

Primeiramente, antes de apresentar os pseudocódigos referentes a cada um dos algoritmos desenvolvidos, é necessário definir algumas variáveis. Denota-se  $n = 1, 2, 3...N$  (sendo  $N$  o conjunto dos números naturais) como os números de solicitações de conexões. Para cada requisição de conexão, existem  $k$  caminhos mais curtos que podem ser selecionados entre o nó de origem e o destino. Os Algoritmos foram testados e validados em duas redes ópticas diferentes, a rede nacional dos Estados Unidos, Figura 18 e uma rede Alemã, Figura 19. Para simular um ambiente real e dinâmico foram gerados conexões em um intervalo de zero a 1000 conexões, sendo que os nós são equiprováveis, ou seja, possuem a mesma probabilidade de serem escolhidos.

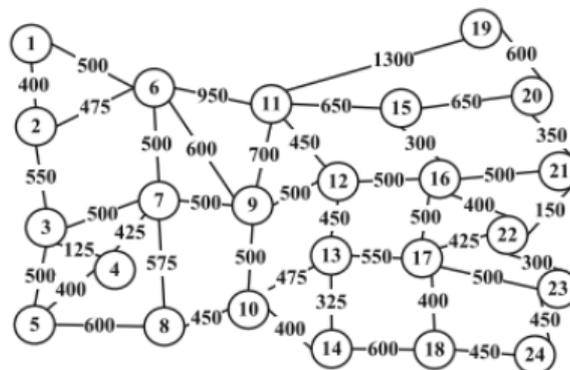


Figura 18 – Rede nacional dos EUA [7]

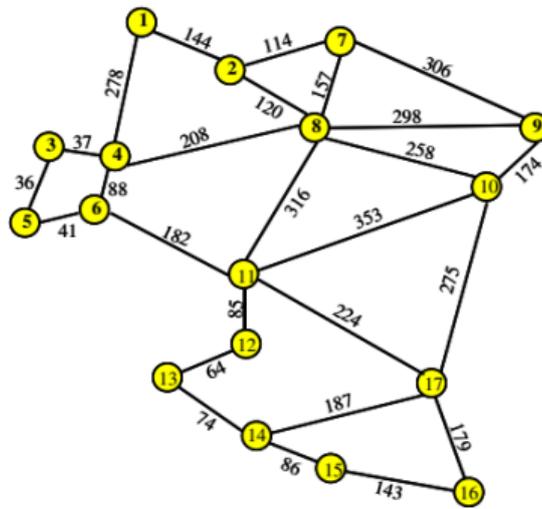


Figura 19 – Rede Alemã [8]

Contemplando todas as opções possíveis de pares de nós em ambas as redes, 552 nós para rede americana e 272 para rede Alemã, é então escolhido um nó de origem e um destino gerando assim uma conexão aleatoriamente, sendo que, todos os nós possuem a mesma probabilidade de serem escolhidos. Todos os nós intermediários entre nó de origem e destino, foi considerado como saltos.

## 4.1 Atribuição de Espectro de Roteamento utilizando Modulação Adaptativa - ER-MA

Visando a diminuição do consumo de energia em redes ópticas elásticas, no algoritmo ER-MA foi aplicado o conceito de modulação adaptativa, utilizando a distância máxima de transmissão apresentado em [40] como principal parâmetro. Basicamente, o algoritmo calcula a distância entre o nó origem ou inicial e o destino ou final, e determina qual é modulação mais indicada com base nos valores definidos na Tabela 2. Para deixar mais claro, vamos utilizar de exemplo, uma topologia de rede fictícia, um grafo conexo representado na Figura 20. Foram escolhidos três *lightpaths* ou caminhos ópticos sendo eles:

- A - B - C - E com distância entre os nós de 1650 km, onde de acordo com MTD a modulação escolhida seria BPSK.
- H - D - G, com distância entre os nós de 894 km, sendo preferencialmente utilizado a modulação 8-PSK

- D - F, com distância entre os nós de 490 km, tendo a modulação escolhida de 32QAM.

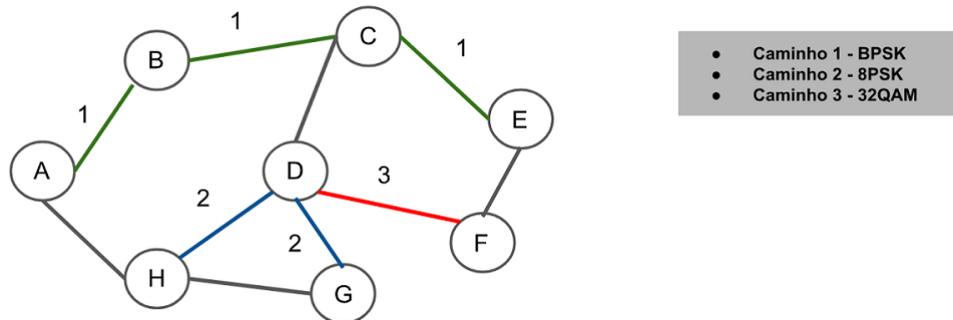


Figura 20 – Exemplo de Rede utilizando Alocação de Modulação Adaptativa

Não há nenhum impedimento de se utilizar a modulação BPSK para os três caminhos ópticos, porém, como será demonstrado nesse Capítulo, a utilização de modulações fixas em redes ópticas gera um gasto de energético muito elevado. A proposta de criar um algoritmo que alterna as modulações utilizadas em cada caminho óptico, é uma forma mais eficiente e econômica, assumindo apenas a modulação suficiente para cada conexão estabelecida. Outra perspectiva, que pode ser abordada, é estimar os custos totais de espectro, requeridos pelas estratégias de modulação fixa e adaptativa através da *Frequency Slot* - FS. Assumindo que, cada caminho necessita de 40 *slots*, conforme com Tabela 2 aplicada a rede da Figura 20, nota-se que aplicando modulação fixa para três caminhos resulta no gasto de 60 FS (20 + 20 + 20). Em contraposição, utilizando a modulação adaptativa, os FS gerados por caminho são respectivamente: 20, 14 e 8, gerando um total de 42 FS, uma diminuição de 30% no uso de *slots de frequência*.

A partir do momento, em que é definido o nó origem e destino de uma conexão, o algoritmo ER-MA calcula a distância entre esses nós, esse valor é utilizado para se determinar, qual modulação será escolhida de acordo com a distância máxima estabelecida em cada modulação. Ou seja, o número de bits por símbolo é transmitido e efetivamente modificado, melhorando a eficiência do espectro, pois a largura de banda disponível é melhor aproveitada, garantindo os requisitos de QoT. Assim, o número de caminhos  $k$  não é fixo, ele é dinamicamente alterado em cada nova conexão, resultando num melhor tempo de processamento, se comparado ao um algoritmo que executa com número fixo de caminhos.

O número de  $k$  caminhos para cada conexão é determinado através da Equação 3.4, que estabelece o gasto energia de um caminho óptico. O algoritmo busca um novo caminho, até que o gasto do caminho atual  $E_k$  seja maior que o  $E_{k-1}$ . Caso essa condição não aconteça o número máximo de caminho será o determinado pelo usuário no início da

simulação. Essa condição foi inserida, pois afirmar que o caminho mais curto sempre será o de menor custo não é verdade, conforme apontado em [25].

Há dois possíveis eventos em que a conexão pode ser efetivamente bloqueada, são eles:

- Se o algoritmo não encontrar uma modulação apropriada para um caminho óptico;
- Ou se Número máximo de bloqueios configurados para rede for atingido.

A Figura 21 apresenta a influência da modulação sobre o consumo de energia, considerando 1000 conexões. Nitidamente, é possível afirmar que, à medida em que se aumenta a complexidade da modulação, o consumo de energia diminui. Isto se deve ao fato de que modulações QAM possuem a capacidade transmitir mais bits de informações. Portanto, gastam uma quantidade menor de energia. BPSK, a modulação mais simples apresentou o maior consumo, enquanto 64QAM apresentou o menor. Nesses testes foi utilizado a Rede Alemã, e não foi considerado bloqueio de conexão.

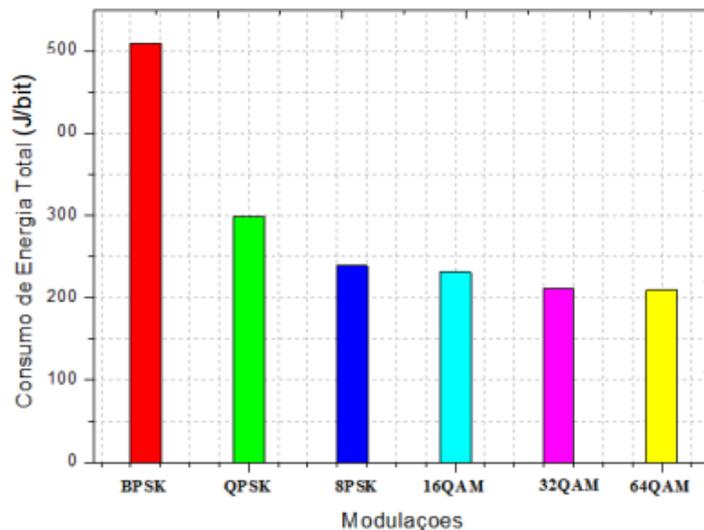


Figura 21 – Consumo de energia em função do número de conexões para as modulações

De modo a validar o algoritmo proposto, o mesmo foi comparado em dois cenários: O primeiro, chamado de MODULAÇÃO FIXA. Nele para toda conexão estabelecida foi aplicado uma única modulação. O segundo, chamado de DISTÂNCIA ADAPTATIVA, utiliza o conceito de mudança dinâmica de modulação. Porém, é selecionado apenas o primeiro caminho mais curto. Abaixo é explicado de forma resumida como cada algoritmo, incluindo o ER-MA, opera:

- **MODULAÇÃO FIXA:** Utilizado o algoritmo de Dijkstra para se obter o caminho mais curto de uma conexão estabelecida, é aplicado a modulação BPSK nesta conexão e realizado cálculo do consumo de energia. Este procedimento é realizado para as  $n$  conexões determinadas pelo usuário.
- **DISTÂNCIA ADAPTATIVA:** Assim como o cenário MODULAÇÃO FIXA, este cenário utiliza o algoritmo de Dijkstra para determinar o caminho mais curto de uma conexão estabelecida. Entretanto, a modulação será determinada pela distância entre o nó final e inicial retornado por Dijkstra de acordo com a tabela 2 na página 25.
- **ER-MA:** De modo distinto aos cenários anteriores, o algoritmo ER-MA processa primeiramente o algoritmo de Yen [43], a fim de selecionar os  $k$ -caminhos mais curtos para conexão estabelecida. Para cada caminho  $k$ , é calculada com base na MTD (*Maximum Transmission Distance*), a modulação que melhor se enquadra neste caminho. A cada interação dos  $k$  caminhos resultantes, o consumo do caminho  $k$  é comparado com o anterior  $k - 1$ , logo. Se o consumo de energia que denominamos de  $E_k$  for menor que  $E_{k-1}$ , o algoritmo será executado para o próximo caminho, caso contrário, o algoritmo é finalizado.

Os resultados apresentados nas Figuras 22 e 23, que foram obtidos utilizando a Equação 3.4 e o algoritmo apresentado nesta seção, demonstram que a técnica desenvolvida é superior aos cenários de MODULAÇÃO FIXA e a DISTÂNCIA ADAPTATIVA. O Algoritmo ER-MA atingiu um consumo de 160 J/bit, enquanto a MODULAÇÃO FIXA teve um consumo de 350 J/bit, mais que o dobro do que o algoritmo desenvolvido. Esse resultado foi alcançado pois o algoritmo ER-MA se adapta a cada nova conexão, escolhendo qual é a melhor modulação que se encaixa na situação atual. Tal procedimento permitiu poupar uma parcela de energia que antes seria gasta pela modulação BPSK. Portanto, a cada nova conexão, à medida em que a modulação se alterna, a diferença entre o gasto energético BPSK e a modulação escolhida é somada a quantidade de energia poupada, gerando ao final, um consumo energético menor.

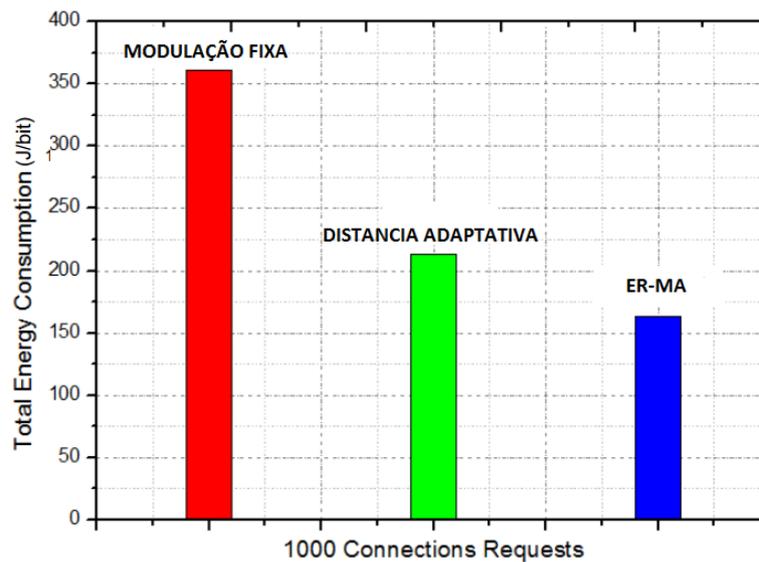


Figura 22 – Consumo total de energia para 1000 conexões em função do número de Conexões para ER-MA,MODULAÇÃO FIXA e DISTÂNCIA ADAPTATIVA

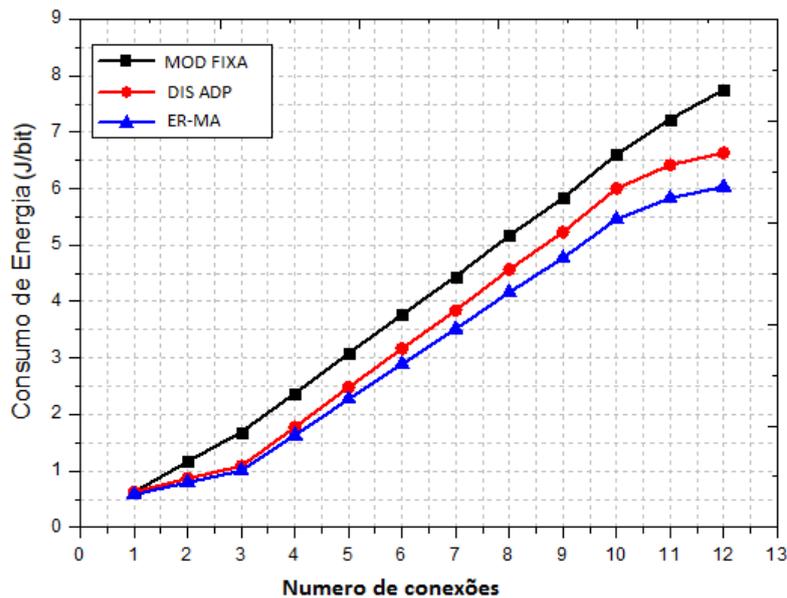


Figura 23 – Consumo de energia versus numeros de conexões

Outra forma de validar o algoritmo ER-MA é analisar a quantidade de bloqueios gerados por ele, pois é possível que o gasto de energia tenha diminuído devido a aumento exponencial do número de bloqueios. Na tabela 3, é descrito uma comparação entre os cenários testados, através dos números, o ER-MA apresentou a menor taxa de bloqueio de 37,9%, que é dado por  $\frac{Block}{N_c}$ , números de total de bloqueio, dividido pelo número total de conexões, uma diferença de 23,3% em comparação com o cenário MODULAÇÃO FIXA e

19,9% com cenário DISTÂNCIA ADAPTATIVA. Isto demonstra que, o algoritmo ER-MA oferece uma solução viável e capaz de cumprir com os requisitos de qualidade serviço e transmissão.

Tabela 3 – Tabela Comparativa da probabilidade de bloqueio, Consumo Total de energia para os algoritmos MODULAÇÃO FIXA, DISTÂNCIA ADAPTATIVA e ER-MA

Algoritmo	Probabilidade bloqueio	Consumo Total de Energia (J/bit)
MODULAÇÃO FIXA	0,612	321,22
DISTÂNCIA ADAPTATIVA	0,578	213,54
ER-MA	0,379	169,56

O algoritmo 1 apresenta o pseudocódigo do ER-MA:

---

### Algorithm 1 ER-MA

---

**Input:** G,k,Nc ▷ G is network, k number of shortest path and Nc Number of Connections  
**Output:** lowerConsumption ▷ The Lower Consumption for each connection

---

```

1: procedure ER-MA(G, k, Nc)
2:   for i ← 1, Nc do
3:     [Path,Cost] = Yen's Algorithm (G,si,di)
4:     [dBpsk,...,d64qam] = MTD (M) ▷ M = (2,4,6,8,16,32,64)
5:     t ← 0;
6:     for j ← 1, k do
7:       if Cost > dBpsk then
8:         Block ← Block+1
9:       else
10:        if Cost > dqpsk and Cost < dBpsk then
11:          m ← 2
12:        else
13:         if Cost > d8psk and Cost < d4psk then
14:           m ← 4
15:         else
16:          if Cost > d16qam and Cost < d8psk then
17:            m ← 8
18:          else
19:           if Cost > d8psk and Cost < d16qam then
20:             m ← 16
21:           else
22:            if Cost > d16qam and Cost < d32qam then
23:              m ← 32
24:            if Cost > d32qam and Cost < d64qam then
25:              m ← 64
26:            end if
27:          end if
28:        end if
29:      end if
30:    end if
31:  end if
32:  Ec ← EnergyConsumption(m)
33:  if Ecj ≠ Ecj-1 then
34:    if Ecj < Ecj-1 then
35:      Lowerconsumption[i] ← Ecj
36:    end if
37:  end if
38: end for
39: end for
40: end for
41: end procedure

```

---

## 4.2 Atribuição de roteamento com FEC adaptativo - FEC ADAPTATIVO

No seção 2.2 desta dissertação, especificamente na Tabela 1 apresentada na página 9, está determinado os tipos de FEC estudados. Entretanto, nesta dissertação houve o foco na utilização de dois deles, o LDPC e RS. O Algoritmo FEC Adaptativo, foi criado com o objetivo de utilizar o conceito de mudança dinâmica, apresentado no ER-MA, porém, focando na adaptabilidade do FEC com propósito de atuar na redução do gasto de energia. Para que seja ilustrado o conceito de FEC Adaptativo é apresentado um exemplo conforme Figura 24.

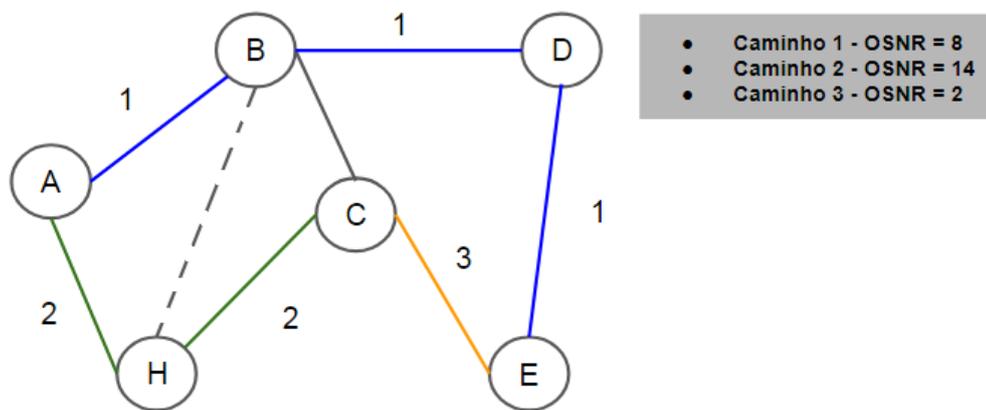


Figura 24 – Caminho óptico para alocação do FEC adaptativo

Seguindo uma topologia de rede fictícia temos:

- O caminho 1, composto dos nós A,B,D e E e um OSNR no valor de 8 dB
- O caminho 2, composto pelos nós A, H e C e um OSNR no valor de 14 dB
- O caminho 3, composto pelos nós C e E e um OSNR no valor de 2 dB

Se aplicado nos caminhos 1, 2 e 3 o mesmo o código FEC, por exemplo, o LDPC, haveria um consumo de energia desnecessário, visto que a utilização deste código de correção deve ser usado em casos a onde o OSNR é baixo. Em [8] é apontado que devido a complexidade, o custo energético do LDPC é superior ao RS. Logo a solução mais inteligente nesse cenário é determinar qual o melhor tipo de FEC com base no OSNR de cada conexão, que é o objetivo principal do algoritmo FEC Adaptativo.

Para cada conexão estabelecida, o FEC Adaptativo alterará dinamicamente de acordo com o OSNR de cada conexão. Ou seja, se o valor da relação sinal ruído do caminho óptico estiver dentro de um intervalo do  $OSNR_{limit}$ , será atribuído ou FEC LDPC ou RS dependendo do intervalo em questão. O objetivo desta alternância de códigos de correção de erro é realizar um melhor uso da largura de banda e do espectro de transmissão, visando sempre manter os requisitos de QoS e QoT.

No algoritmo FEC Adaptativo, o bloqueio de uma conexão pode ocorrer em dois tipos de eventos. O primeiro é se o número de bloqueios máximo definido pelo usuário atingiu o limite. O segundo é se o algoritmo não encontrar um código FEC adequado para o caminho óptico testado. Foi determinado 3 cenários de testes, para validar se o algoritmo em questão conseguiu atingir o objetivo de realizar a redução do consumo de energia.

- FEC-FIXO: nesse cenário, para toda conexão estabelecida, foi realizado o uso apenas do código LDPC. A escolha dessa modulação pode ser explicada pelo fato de que, tradicionalmente, as redes ópticas buscam sempre a atender o pior caso. Portanto, o uso do LDPC garante que a rede suporte taxas altas de ruído.
- FEC-ADPK1: nesse cenário, o conceito do FEC Adaptativo já é implementado, porém o algoritmo apenas trabalha com um único caminho de menor custo. Para selecionar é utilizado o algoritmo de Dijkstra e o cálculo de consumo de energia é realizado de acordo com a Equação 3.4
- FEC-ADPK3: nesse cenário, o conceito de FEC Adaptativo também é implementado, só que diferente de FEC-ADPK1. Aqui são selecionados  $k$  – caminhos de acordo com a necessidade de simulação do usuário. No caso desta dissertação os valores de caso utilizados foram 3 e 5. O algoritmo inicia-se buscando os  $k$  – caminhos mais curtos utilizando o algoritmo de Yen, e de acordo com OSNR associado a essa conexão, é determinado qual o código FEC será utilizado. Em casos de OSNR abaixo de 9,1 dB, a conexão será bloqueada e o algoritmo inicia o processo para próxima conexão. O consumo de energia  $Ec_j$  é calculado e aplicado a regra: Se  $Ec_j$  for maior que  $Ec_{j-1}$ , finalizado-se e busca a próxima conexão.

A Figura 25 um consumo de energia do FEC Adaptativo menor entre os cenários testados. Foram realizados testes variando o número de conexões em um intervalo de 0 a 2000 conexões, no qual foi utilizado o algoritmo apresentado nesta seção. É possível identificar que utilizando o conceito de FEC fixo o gasto de energia foi em torno de 1000 J/bit. Enquanto ao utilizar a técnica de FEC adaptativo, foi obtido uma redução de 300 J/bit com o uso de apenas um caminho de busca, e mais de 600 J/bit utilizando 3 caminhos.

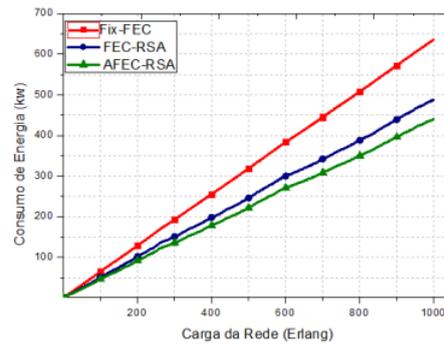


Figura 25 – Consumo de energia versus numeros de conexões, considerando os três cenários testados, FEC FIXO, FEC ADP  $K = 1$  e FEC ADO  $K = 3$

Importante ressaltar que foi identificado que a utilização de mais que 3 caminhos não resulta em uma maior queda de consumo, pelo menos não na rede que foi testada. A Figura 26 mostra que a partir de  $k = 3$ , o consumo de energia se estabiliza e passa a ser exatamente igual quando utilizado 3 caminhos mais curtos.

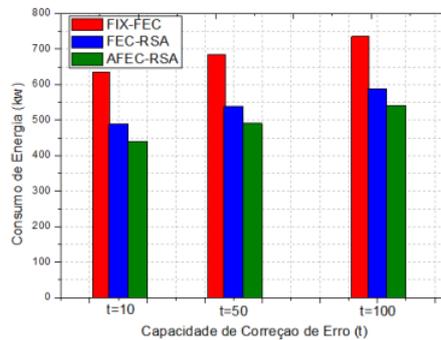


Figura 26 – Consumo de energia considerando 2000 conexões

---

**Algorithm 2** FEC ADAPTATIVO
 

---

**Input:**  $G, k, N_c, \text{BlockMax}, \text{OSNR}$      $\triangleright$   $G$  is network,  $k$  number of shortest path and  $N_c$  Number of Connections,  $\text{BlockMax}$  is the Max Block Allowed

**Output:** Menor Consumo de Energia     $\triangleright$  O menor Consumo de Energia para cada Pedido de Conexão

---

```

1: procedure FEC ADAPTATIVO( $G, k, N_c, \text{BlockMax}, \text{OSNR}$ )
2:   for  $i \leftarrow 1, N_c$  do
3:     [ $\text{Path}, \text{Cost}$ ] = Yen's Algorithm ( $G, s_i, d_i$ )
4:     [ $\text{FEC1}, \dots, \text{FEC } 3$ ] = OSNR ( $t$ )
5:     if  $\text{OSNR} \geq 14.5\text{dB}$  then
6:        $\text{codeFEC} \leftarrow \text{FEC1}$ 
7:     else
8:       if  $\text{OSNR} \geq 12.6\text{dB}$  and  $\text{OSNR} \leq 14.5\text{dB}$  then
9:          $\text{codeFec} \leftarrow \text{FEC2}$ 
10:      else
11:        if  $\text{OSNR} \geq 9.1\text{dB}$  and  $\text{OSNR} \leq 12.6\text{dB}$  then
12:           $\text{codeFec} \leftarrow \text{FEC3}$ 
13:        end if
14:      end if
15:    end if
16:    for  $j \leftarrow 1, k$  do
17:      if  $\text{Cost} < 9.1\text{dB}$  then
18:         $\text{Block} \leftarrow \text{Block} + 1$ 
19:        if  $\text{BlockMax} = \text{Block}$  then
20:          break;
21:        end if
22:         $\text{Ec} \leftarrow \text{EnergyConsumption}(t, \text{OSNR})$ 
23:        if  $\text{Ec}_j \neq \text{Ec}_{j-1}$  then
24:          if  $\text{Ec}_j < \text{Ec}_{j-1}$  then
25:             $\text{Lowerconsumption}[i] \leftarrow \text{Ec}_j$ 
26:          end if
27:        end if
28:      end if
29:    end for
30:  end for
31: end procedure

```

---

### 4.3 Técnica Híbrida em Redes ópticas Elásticas - ROE-TH

Nas Seções 4.2 e 4.3 deste Capítulo é discute-se que o consumo de energia, quando se utiliza técnicas de modulação e FEC adaptativo pode ser reduzido. Logo, o estudo e análise da combinação dessas duas técnicas torna-se um objeto de pesquisa interessante. Pensando na combinação dessas duas técnicas, foi desenvolvido o ROE-TH. Trata-se de algoritmo híbrido que funde as duas propostas: Modulação Adaptativa e FEC Adaptativo, com o objetivo principal de focar essencialmente na redução de taxa de bloqueios de uma rede.

Inicialmente, assim como o ER-MA, o algoritmo ROE-TH executa o algoritmo de Yen para selecionar os  $k$ -menores caminhos. Para cada  $k$ -caminho, é identificado qual modulação melhor se encaixa e então o algoritmo calcula o gasto de energia seguindo os mesmos padrões do ER-MA. A diferença está, no caso quando a distância entre o nó origem e destino é superior a MTD de BPSK. Nesse cenário, é aplicado o código de correção de erro LDPC ou RS, dependendo da relação óptica sinal ruído presente naquela conexão.

O objetivo é estender o alcance da modulação BPSK, aplicando um código de correção de erro a fim de manter o nível de QoS e QoT, e reduzindo a chance de bloqueio de uma determinada conexão. O código de correção de erro não é aplicado antes pois a própria MTD já nos garante um padrão de QoS e QoT.

Para que uma conexão seja bloqueada existe dois eventos possíveis neste algoritmo:

- O primeiro, é se o número de bloqueios máximo determinado pelo usuário foi atingido
- O segundo, é se a distância entre nó origem e destino for superior a MTD e se OSNR for inferior a 9,1 dB.

Os resultados das simulações deste algoritmo são apresentados nas Tabelas 4 e 5, utilizando o calculo de consumo de energia de acordo com a Equação 3.4 e executando o código disponível no Anexo C. Na Tabela 4, é apresentado o número de bloqueios obtidos dado um determinado número de conexões, comparando os algoritmos desenvolvidos nesta dissertação. É possível concluir que o algoritmo ER-MA teve um número baixo de bloqueios e que o ROE-TH não bloqueou nenhuma conexão. Isso ocorre, pois a rede utilizada neste teste foi a GERMANY. Esta rede possui um distância média entre os nós que está no intervalo da MTD das modulações e portanto apenas o uso de modulação adaptativa supre as necessidades da rede.

Tabela 4 – Número de conexões bloqueadas para o algoritmo FEC ADAPTATIVO,ER-MA,HAMC-RSA

Carga da Rede	FEC ADAPTATIVO	ER-MA	ROE-TH
50	11	0	0
100	26	0	0
250	76	1	0
500	143	3	0
1000	289	9	0
1500	402	10	0
2000	540	15	0

Aplicando o algoritmo em uma rede de porte maior, como a USA uma rede que faz a interligação entre diversos estados americanos, o resultado obtido é descrito na Tabela 5. O algoritmo ROE-TH apresenta taxas de bloqueios de variam entre 9 a 14%, enquanto EM-RA obteve um pico de 72% e depois a taxa se estabilizou entre 33% a 37%. Esse comportamento é explicado pela utilização de código de correção erro. No algoritmo ROE-TH, ao utilizar o LDPC e RS, a conexão não é bloqueada quando ultrapassa a distância da MTD, desde que o OSNR desta conexão seja aceitável. Ou seja, quando  $OSNR > 9,1dB$ , o algoritmo permite que conexão seja executada, pois os erros de transmissão resultante da longa distância de transmissão são balanceados pela correção aplicada pelos códigos LDPC e RS.

Tabela 5 – Comparação entre Algoritmo ER-MA e ROE-TH com base na taxa de bloqueio

Carga da Rede	EA-MA	Taxa de Bloqueio	ROE-TH	Taxa de Bloqueio
50	36	0,72	7	0,14
100	60	0,6	12	0,12
250	89	0,37	250	0,12
500	175	0,35	56	0,11
1000	338	0,34	105	0,11
1500	449	0,30	141	0,09
2000	670	0,33	187	0,09

**Algorithm 3** ROE-TH

**Input:**  $G, k, N_c, \text{BlockMax}, \text{OSNR}, t$   $\triangleright$   $G$  é o tipo da rede,  $k$  número de menor caminho óptico,  $t$  capacidade de correção do código and  $N$  Número de conexões,  $\text{BlockMax}$  Máximo bloqueio Permitido

**Output:**  $\text{lowerConsumption}$   $\triangleright$  Menor consumo por Conexão

---

```

1: procedure ROE-TH( $G, k, N_c, \text{BlockMax}, \text{OSNR}$ )
2:   for  $i \leftarrow 1, N_c$  do
3:     [ $\text{Path}, \text{Cost}$ ] = Yen's Algorithm ( $G, s_i, d_i$ )
4:     [ $d\text{Bpsk}, \dots, d64\text{qam}$ ] = MTD (M)  $\triangleright M = (2, 4, 6, 8, 16, 32, 64)$ 
5:     [ $\text{FEC}1, \dots, \text{FEC}3$ ] = OSNR ( $t$ )  $\triangleright t = (0, \dots, 100)$ 
6:     if  $\text{OSNR} \geq 14.5\text{dB}$  then
7:        $\text{codeFEC} \leftarrow \text{FEC}1$ 
8:     else
9:       if  $12.6\text{dB} \leq \text{OSNR} \leq 14.5\text{dB}$  then
10:         $\text{codeFec} \leftarrow \text{FEC}2$ 
11:      else
12:        if  $9.1\text{dB} \leq \text{OSNR} \leq 12.6\text{dB}$  then
13:           $\text{codeFec} \leftarrow \text{FEC}3$ 
14:        else
15:           $\text{code} \leftarrow$  Ajustar a Largura de Banda
16:        end if
17:      end if
18:    end if
19:    for  $j \leftarrow 1, k$  do
20:      if  $\text{Cost} > d\text{Bpsk}$  then
21:         $\text{Block} \leftarrow \text{Block} + 1$ 
22:        if  $\text{BlockMax} = \text{Block}$  then
23:          break;
24:        end if
25:      else
26:        if  $\text{Cost} > d\text{qpsk}$  and  $\text{Cost} < d\text{Bpsk}$  then
27:           $m \leftarrow 2$ 
28:        else
29:          if  $\text{Cost} > d8\text{psk}$  and  $\text{Cost} < d4\text{psk}$  then
30:             $m \leftarrow 4$ 
31:          else
32:            if  $\text{Cost} > d16\text{qam}$  and  $\text{Cost} < d8\text{psk}$  then
33:               $m \leftarrow 8$ 
34:            else
35:              if  $\text{Cost} > d8\text{psk}$  and  $\text{Cost} < d16\text{qam}$  then
36:                 $m \leftarrow 16$ 
37:              else
38:                if  $\text{Cost} > d16\text{qam}$  and  $\text{Cost} < d32\text{qam}$  then
39:                   $m \leftarrow 32$ 
40:                if  $\text{Cost} > d32\text{qam}$  and  $\text{Cost} < d64\text{qam}$  then
41:                   $m \leftarrow 64$ 
42:                end if
43:              end if
44:            end if
45:          end if
46:        end if
47:      end if
48:    end if
49:     $\text{Ec} \leftarrow \text{EnergyConsumption}(m, \text{FEC})$ 
50:    if  $\text{Ec}_j \neq \text{Ec}_{j-1}$  then
51:      if  $\text{Ec}_j < \text{Ec}_{j-1}$  then
52:         $\text{Lowerconsumption}[i] \leftarrow \text{Ec}_j$ 
53:      end if
54:    end if
55:  end for
56: end for
57: end procedure

```

---

## 5 Conclusão

O gasto de energia dos equipamentos de uma rede de telecomunicações representa uma parcela significativa de todo o consumo mundial de energia. Serviços que necessitam de uma grande quantidade de largura de banda, como: serviços de *voip* e *streaming* e os equipamentos de suporte à tecnologia da informação utilizado nas atuais redes de telecomunicações, exigem uma imensa quantidade de energia para sua operação. O consumo de energia relacionado à infraestrutura de informação e comunicações (ICT), irá corresponder em 14% de toda energia consumida até o ano de 2020.

O Objetivo inicial deste trabalho era realizar a implementação de um único algoritmo, utilizando técnicas de modulação adaptativa, visando a diminuição do gasto de energia em redes de fibra óptica. Porém, à medida que o estudo foi evoluindo, percebeu-se que era possível a criação de novos algoritmos. Todos os algoritmos foram desenvolvidos na Linguagem Matlab e tiveram um tempo de processamento em média de 40 a 150 segundos dependendo do número de conexões e caminhos escolhidos.

Os algoritmos propostos apresentaram novas estratégias visando a redução de gasto energético e diminuição da taxa de bloqueios em redes ópticas elásticas. A primeira estratégia (ER-MA) foi desenvolvida com objetivo de alocar dinamicamente a modulação de um determinado conjunto de conexões. O Algoritmo ER-MA obteve uma redução de 47% em relação aos cenários de MOD FIXA e DIS ADP.

A segunda estratégia FEC ADAPTATIVO teve como objetivo alocar dinamicamente o tipo de código de correção de erro ou FEC, aplicando o código LDPC ou RS em um determinado conjunto de conexões, variando entre eles, dependendo da relação sinal ruído óptica (OSNR). A troca dinâmica entre esses dois tipos de códigos resultou numa redução de 70% do consumo de energia se comprado ao modelo usual no qual se utilização LDPC fixa, visando sempre atender o pior caso.

Finalmente, uma técnica híbrida (ROE-TH), que é a combinação entre as técnicas ER-MA e FEC ADAPTATIVO trabalhando simultaneamente, foi desenvolvida. O objetivo principal dessa técnica é diminuir a taxa de bloqueio. Com a operação simultânea de ER-MA e FEC adaptativo foi possível atingir taxas de bloqueios no intervalo de 9 a 14% consideradas satisfatórias em termos de QoS e QoT. Adicionalmente, com base nos resultados e gráficos gerados, nota-se que o gasto energia de um conjunto de conexões diminui proporcionalmente com o aumento da complexidade da modulação.

Os próximos passos desta pesquisa apontam para realização de testes em ambiente real, visto que, todos os testes realizados nesta dissertação são em ambiente de simulação. Outro ponto é verificar qual é o impacto da eficiência energética quando aplicado as

técnicas apresentadas. Outra proposta interessante seria a abordagem de lógica *fuzzy* nos cálculos apontados, as variáveis tratadas podem ser transformadas como variáveis difusas e, assim, trabalhadas. Por fim, a construção de um simulador no qual permitir escolher a rede que será testada e os algoritmos que se deseja testar, de modo que possa ser disponibilizado para demais pesquisadores.

## 5.1 Publicações

Nesta sessão estão apresentados os artigos que foram publicados durante o período de estudo e pesquisa no estado da arte.

- *S.Y.M. BANDIRI, R.S.M. BRAGA and D.H. SPADOTI "Analytical Comparison of the Performance of adaptive Modulation in Elastic Optical Network and coding in wireless network under rayleigh fading" Journal of Microwave and Optoelectronics, 2017*
- *S.Y.M. BANDIRI, R.S.M. BRAGA and D.H. SPADOTI "Energy Consumption Improvement based on Distance Adaptive Modulation in Elastic Optical Network" 17th ICCDCS- Cozumel, Mexico, 2017, pp:29-32*

# Referências

- [1] Andrew Odlyzko, S Hong, and A Pakanati. Minnesota internet traffic studies (mints). *University of Minnesota*, 2009. Citado na página 1.
- [2] Jiayuan Wang, Sergio Ricciardi, Anna Manolova Fagertun, Sarah Ruepp, Davide Careglio, and Lars Dittmann. Energy-aware routing optimization in dynamic gmpls controlled optical networks. In *Transparent Optical Networks (ICTON), 2012 14th International Conference on*, pages 1–4. IEEE, 2012. Citado na página 1.
- [3] Sergio Ricciardi, Francesco Palmieri, Ugo Fiore, Davide Careglio, Germán Santos-Boada, and Josep Solé-Pareta. An energy-aware dynamic rwa framework for next-generation wavelength-routed networks. *Computer Networks*, 56(10):2420–2442, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 4.
- [4] Sergio Ricciardi, Davide Careglio, Francesco Palmieri, Ugo Fiore, Germán Santos-Boada, and Josep Solé-Pareta. Energy-aware rwa for wdm networks with dual power sources. In *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 29.
- [5] Rajiv Ramaswami, Kumar Sivarajan, and Galen Sasaki. *Optical networks: a practical perspective*. Morgan Kaufmann, 2009. Citado 6 vezes nas páginas 1, 5, 14, 16, 18 e 20.
- [6] Yang Wang, Xiaojun Cao, and Yi Pan. A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path networks. In *INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE*, pages 1503–1511. IEEE, 2011. Citado na página 1.
- [7] Jijun Zhao, Qiuyan Yao, Xin Liu, Wei Li, and Martin Maier. Distance-adaptive routing and spectrum assignment in ofdm-based flexible transparent optical networks. *Photonic Network Communications*, 27(3):119–127, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 7, 2 e 30.
- [8] Fabio Durand and Taufik Abrao. Energy efficiency analysis in adaptive fec-based lightpath elastic optical networks. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 24(09):1550133, 2015. Citado 11 vezes nas páginas 7, 3, 9, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 31 e 37.
- [9] Ori Gerstel, Masahiko Jinno, Andrew Lord, and SJ Ben Yoo. Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer? *IEEE Communications Magazine*, 50(2), 2012. Citado 3 vezes nas páginas 4, 5 e 6.

- [10] Christoph Lange, Dirk Kosiankowski, Christoph Gerlach, Fritz-Joachim Westphal, and Andreas Gladisch. Energy consumption of telecommunication networks. In *Optical Communication, 2009. ECOC'09. 35th European Conference on*, pages 1–2. IEEE, 2009. Citado na página 4.
- [11] Masahiko Jinnó, Hidehiko Takara, Bartłomiej Kozicki, Yukio Tsukishima, Yoshiaki Sone, and Shinji Matsuoka. Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies. *IEEE Communications Magazine*, 47(11), 2009. Citado na página 5.
- [12] Ioannis Tomkos, Siamak Azodolmolky, Josep Sole-Pareta, Davide Careglio, and Eleni Palkopoulou. A tutorial on the flexible optical networking paradigm: State of the art, trends, and research challenges. *Proceedings of the IEEE*, 102(9):1317–1337, 2014. Citado na página 5.
- [13] J Faezah and K Sabira. Adaptive modulation for ofdm systems. *International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS)*, 1(2), 2009. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.
- [14] Konstantinos Christodoulopoulos, Ioannis Tomkos, and EA Varvarigos. Elastic bandwidth allocation in flexible ofdm-based optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 29(9):1354–1366, 2011. Citado na página 5.
- [15] Sriram Vishwanath and Andrea Goldsmith. Adaptive turbo-coded modulation for flat-fading channels. *IEEE Transactions on Communications*, 51(6):964–972, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.
- [16] Guoying Zhang, Marc De Leenheer, Annalisa Morea, and Biswanath Mukherjee. A survey on ofdm-based elastic core optical networking. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(1):65–87, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.
- [17] Taesang Yoo, Richard J Lavery, Andrea Goldsmith, and David J Goodman. Throughput optimization using adaptive techniques. *IEEE Communication Letters*, 2006. Citado na página 6.
- [18] Jose Marcos C Brito and IS Bonatti. An analytical comparison among adaptive modulation, adaptive fec, adaptive arq and hybrid systems for wireless atm networks. In *Wireless Personal Multimedia Communications, 2002. The 5th International Symposium on*, volume 3, pages 1034–1038. IEEE, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 6, 8 e 9.
- [19] Sami HO Salih and Mamoun MA Suliman. Implementation of adaptive modulation and coding techniques using matlab. In *ELMAR, 2011 Proceedings*, pages 137–139. IEEE, 2011. Citado na página 7.

- [20] John G Proakis. *Companders*. Wiley Online Library, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 8.
- [21] Bane Vasic and Ivan B Djordjevic. Low-density parity check codes for long-haul optical communication systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, 14(8):1208–1210, 2002. Citado na página 9.
- [22] Ivan B Djordjevic and Bane Vasic. Nonbinary ldpc codes for optical communication systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, 17(10):2224–2226, 2005. Citado na página 9.
- [23] René-Jean Essiambre, Gerhard Kramer, Peter J Winzer, Gerard J Foschini, and Bernhard Goebel. Capacity limits of optical fiber networks. *Journal of Lightwave Technology*, 28(4):662–701, 2010. Citado na página 9.
- [24] Takashi Mizuochi. Recent progress in forward error correction and its interplay with transmission impairments. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 12(4):544–554, 2006. Citado na página 9.
- [25] Sabi Yari Moïse Bandiri, Tales Cleber Pimenta, and Danilo Henrique Spadoti. Adaptive modulation and code strategy to reduce energy consumption in elastic optical network. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 17(1):65–84, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 8, 9, 25 e 33.
- [26] Frank Heart, Alex McKenzie, John McQuillian, and David Walden. Arpanet completion report. *BBN Report. Bolt, Beranek and Newman Inc.(BBN). Also published in an edited version as BBN Report*, 4799:58–63, 1978. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.
- [27] Paulo Oswaldo Boaventura Netto. *Grafos: teoria, modelos, algoritmos*. Edgard Blücher, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.
- [28] Reinaldo Golmia Dante. *Algoritmos de roteamento e atribuição de comprimentos de onda para as redes ópticas inteligentes e transparentes*. PhD thesis, Ph. D. dissertation, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 12, 13 e 14.
- [29] L Wei. China’s optical-network evolution. *SPIE’s OEMagazine*, pages 22–25, 2002. Citado na página 12.
- [30] N Shimojoh, T Naito, T Terahara, H Deguchi, K Tagawa, M Suyama, and T Chikama. 32 channel 5.3 gbit/s transmission experiment over 9879 km using broadband edfas. *Electronics Letters*, 33(10):877–879, 1997. Citado na página 13.

- [31] Mohammad Ilyas and Hussein T Mouftah. *The Handbook of optical communication networks*. CRC Press, 2003. Citado na página 13.
- [32] José Antônio Justino Ribeiro. Características da propagação em fibras ópticas. *Instituto Nacional de Telecomunicações*, 1999. Citado na página 14.
- [33] Julia Christina Kasper, Michael Wiggenghorn, Manfred Resch, and Wolfgang Friess. Implementation and evaluation of an optical fiber system as novel process monitoring tool during lyophilization. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 83(3):449–459, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 19.
- [34] Aysegül Gençata, Narendra Singhal, and Biswanath Mukherjee. Overview of optical communication networks: Current and future trends. *Handbook of Optical Communication Networks*, pages 2–21, 2003. Citado 4 vezes nas páginas 15, 16, 17 e 20.
- [35] M Yasin Akhtar Raja. Evolution of optical networks architecture. *The Handbook of Optical Communication Networks*, page 29, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 20.
- [36] AD Ellis, DM Patrick, D Flannery, RJ Manning, DAO Davies, and DM Spirit. Ultra-high-speed otdm networks using semiconductor amplifier-based processing nodes. *Journal of Lightwave Technology*, 13(5):761–770, 1995. Citado na página 17.
- [37] C Siva Ram Murthy and Mohan Gurusamy. *WDM optical networks: concepts, design, and algorithms*. Prentice Hall, 2002. Citado na página 18.
- [38] Kyungsik Lee, Kug Chang Kang, Taehan Lee, and Sungsoo Park. An optimization approach to routing and wavelength assignment in wdm all-optical mesh networks without wavelength conversion. *ETRI journal*, 24(2):131–141, 2002. Citado na página 21.
- [39] Nico Wauters and Piet Demeester. Design of the optical path layer in multiwavelength cross-connected networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 14(5):881–892, 1996. Citado na página 21.
- [40] Axel Klekamp, Roman Dischler, and Fred Buchali. Transmission reach of optical-ofdm superchannels with 10-600 gb/s for transparent bit-rate adaptive networks. In *European Conference and Exposition on Optical Communications*, pages Tu–3. Optical Society of America, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 31.
- [41] Bipin Sankar Gopalakrishna Pillai, Behnam Sedighi, Kyle Guan, N Prasanth Anthapadmanabhan, William Shieh, Kerry J Hinton, and Rodney S Tucker. End-to-end energy modeling and analysis of long-haul coherent transmission systems. *Journal of Lightwave Technology*, 32(18):3093–3111, 2014. Citado na página 26.

- 
- [42] Kyle Guan, Bipin Sankar Gopalakrishna Pillai, Arun Vishwanath, Daniel C Kilper, and Jaime Llorca. The impact of error control on energy-efficient reliable data transfers over optical networks. In *Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on*, pages 4083–4088. IEEE, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- [43] Jin Y Yen. Finding the k shortest loopless paths in a network. *management Science*, 17(11):712–716, 1971. Citado na página 34.

# ANEXO A – Parâmetros Do Enlace da Fibra óptica

Variável	Valor Adotado
$D$ - Parâmetro de dispersão	16.5(ps/(nm.km))
$\beta$ - Dispersão de grupo de velocidade	20.7(ps <sup>2</sup> /km)
$\lambda$ - Comprimento de onda	1500(nm)
$\Delta\lambda$ - Espaçamento do canal	0.1(nm)
$\gamma_n$ - Coeficiente de não linearidade de fibra	1.3(1/W.km)
$\alpha$ - Coeficiente de perda da fibra	0.2(dB/km)
$L_s$ - comprimento de span	80(km)
$h$ - Constante de Planck	6,6x10 <sup>34</sup> (J/Hz)
$v$ - Frequência da luz	1931(THZ)
$N_{node,i}$ - Penalidade da potência do ruído BV-OCX	1dB
$N_c$	Números de canais
$P_e$ - Probabilidade erro de símbolo (sem código FEC)	10 <sup>-5</sup>

# ANEXO B – Variáveis do Consumo de Energia

Variável	Valor Adotado
$N_{eo}$ - Eficiência do consumo de energia	1%
$N_t$ - Eficiência do Transpônder	1.5(W/Gbps)
$E_{op}^G$ - Energia de operação por porta	0.69 $p_t V^2$ (fJ)
$E_R^{op}$ - Energia de acesso por registro	3.42 $p_t V^2$ (fJ)
$B$ - Comprimento do arquivo transmitido	100(GB)
$n_c$ - Número de Frame	10 <sup>7</sup> (frames)
$h_s$ - Tamnho do cabeçalho	64(B)
$\varepsilon$ - Eficiência espectral	1, 2, 3, 4, 5, 6(b/s/Hz)
$E_{p-s}$ - Conversão Paralelo Serie	4.0/( $\varepsilon \cdot F_s$ )(J/bit)
$F_D$ - Figura de mérito DAC	1.56x10 <sup>-12</sup> (J/conv)
$n_d$ - Resolução DAC	4, 6, 8(bits)
$F_s$ - Frequência de amostragem	2R/ $\varepsilon$ (Hz)
$V_{cc}$ - Tensão de alimentação do driver do modulador	5.2(V)
$V_{pp}$ - Tensão de balanço de pico do modulador	8(V)
$R_T$ - Resistência á terminação do modulador	50(Ohm)
$L_{mod}$ - Excesso de per óptica	2.5(dB)
$\mathfrak{R}$ - Responsividade Fotodiodo	0.9(A/W)
$V_{bias}$ - Tensão de polarização do fotodiodo	3.3(V)
$C_{LDPC}$ - Taxa de código	0.83
$\eta_{ADC}$ - Resolução DAC	8(bits)
$E_{LO}$ - Consumo do oscilador local	5/ $\varepsilon \cdot F_s$
$E_{CD}$ - Consumo de compensação de CD	324/ $\varepsilon \cdot F_s$ (pJ/bit)
$E_{TR}$ - Consumo de TR	104/ $\varepsilon \cdot F_s$ (pJ/bit)
$E_{PMD}$ - Consumo de compensação PMD	246/ $\varepsilon \cdot F_s$ (pJ/bit)
$E_{CR}$ - Consumo de transportadora de recuperação	56/ $\varepsilon \cdot F_s$ (pJ/bit)
$P_{sat}$ - Energia de saturação do EDFA	16(dBm)
$G_0$ - Ganho espectral do EDFA	15 - 4 × 10 <sup>16</sup> ( $\lambda - 1555 \times 10^{-9}$ ) <sup>2</sup>
$\eta_{EPCE}$ - Eficiência de conversão do EDFA	1%
$P_{LCOS}$ - Consumo do porto BV-0XC	4(W)

## ANEXO C – Algoritmo em Matlab

```

1 clc
2 close all
3 clear all
4
5 tic
6
7 entrada2 = (' \nEntre com um valor para t variando de 0 a 7: ');
8 fcorrecaoErro = input(entrada2);
9
10
11 entrada2 = ('\nQual rede utilizada?\n 1:Germany\n\ 2:USA\n\n Digite sua opcao: ');
12 tipo_rede = input(entrada2);
13
14 entrada = ('\n\nEntre com numero de conexoes: ');
15 numerosConexoes = input(entrada);
16
17 entrada = ('\nNumeros de Caminhos por conexao: '); % Numeros de caminhos
18 ncaminhos = input(entrada);
19
20 entrada = ('\nEntre com numero de bloqueios maximo: ');
21 bloqueiosMaximo = input(entrada);
22
23 entrada = ('\nEntre com nome do arquivo onde sera salvo o resultado: ');
24 arquivoName = input(entrada, 's');
25 extension = '.txt';
26 arquivoName = strcat(arquivoName, extension);
27
28 if(tipo_rede == 1)
29
30     arquivo = fopen('grafo_rede_alema.txt'); % lendo arquivo.txt com os valores
31     Rede = fscanf(arquivo, '%f', [17 17]); % montando a matriz de entradas
32
33     arquivo_origem = fopen('origem_rede_alema.txt');
34     origem = fscanf(arquivo_origem, '%d', [1 numerosConexoes]);
35
36     arquivo_destino = fopen('destino_rede_alema.txt');
37     destino = fscanf(arquivo_destino, '%d', [1 numerosConexoes]);
38
39     arquivo_transmissao = fopen('transmissao_alema.txt');
40     transmissao = fscanf(arquivo_transmissao, '%d', [1 numerosConexoes]);
41 else
42     arquivo = fopen('grafo_rede_usa.txt'); % lendo arquivo.txt com os valores
43     Rede = fscanf(arquivo, '%f', [24 24]); % montando a matriz de entradas
44
45     arquivo_origem = fopen('origem_rede_usa.txt');
46     origem = fscanf(arquivo_origem, '%d', [1 numerosConexoes]);
47
48     arquivo_destino = fopen('destino_rede_usa.txt');
49     destino = fscanf(arquivo_destino, '%d', [1 numerosConexoes]);
50
51     arquivo_transmissao = fopen('transmissao_usa.txt');
52     transmissao = fscanf(arquivo_transmissao, '%d', [1 numerosConexoes]);

```

```

53 end
54
55     arquivo_OSNR = fopen('OSNR.txt');
56     OSNR = fscanf(arquivo_OSNR, '%f', [1 numerosConexoes]);
57
58 %disp(Rede); % descomentar essa linha caso
59             % queira imprimir a rede
60
61 Rede = 1e3*Rede;
62
63 resultado = cell(1,numerosConexoes);
64 ConsumoOpticoTotal = zeros(1,numerosConexoes);
65
66
67 barra = waitbar(0, 'Rodando experimento ...', 'CreateCancelbtn', 'setappdata(gcf, ''
        canceling'',1)');
68 setappdata(barra, 'canceling',0);
69
70 contador = 0;
71 bloqueio = 0;
72 bloqueio_final = 0;
73
74
75     for x = 1:numerosConexoes
76
77         if(getappdata(barra, 'canceling'))
78             break;
79         end
80
81         if(bloqueio_final == bloqueiosMaximo)
82             break;
83         end
84
85         contador = contador + 1;
86
87         % —— Parametros do link de fibra optica —— %
88
89         D = 16.5; % Dispersion parameter
90         beta = 20.7; % Group velocity dispersion (ps2/km)
91         lambda = 1550e-9; % Wavelength (nm)
92         DeltaLamda = 0.1; % Channel spacing (nm)
93         Yn = 1.3; % Fiber nonlinearity coefficient
94         alpha = 0.2; % Fiber loss coefficient (dB/km)
95         Ls = 80; % Span Lenght (km)
96         h = 6.63*10-34; % Planck constant (J/Hz)
97         v = 193e12; % Light Frequency (THz)
98         Nnode_i = 1.26; % BV-OXC Noise power penalty (dB)
99         Nc = 100; % Number of Channels
100
101
102         % —— Variaveis do consumo de energia —— %
103
104         neo = 0.1; % Power conversion efficiency (porcentagem)
105         nt = 1.5/1e9; % Transponder efficiency (W/Gbps)
106         pt = 40*1e-9; % CMOS process technology feature utilizado
            no calculo do Egop e Erop
107         V = 0.8; % CMOS supply voltage utilizado no calculo do
            Egop e Erop
108         EGop = (0.69*pt*(0.82)); % Energy per gate operation (fJ)
109         ERop = (3.43*pt*(0.82)); % Energy per register access (fJ)

```

```

110     B = 100*1e9; % Transmitted file size (GB)
111     nc = 10^7; % number of frames (frames)
112     hs= 64; % Header Size
113     FD = 1.56e-12; % DAC figure of merit (J/conv)
114     Vcc = 5.2; % Modulator driver supply voltage (V)
115     Vpp = 8; % Modulator peak swing voltage
116     RT = 50; % Modulator termination resistance (ohms)
117     Lmod = 2.5; % Optical excess loss (dB)
118     Resp = 0.9; % Photodiode responsivity (A/W)
119     Vbias = 3.3; % Photodiode bias voltage (V)
120     Cldpc = 0.83; % Code Rate
121     nadc = 8; % DAC resolution (bits)
122     nepce = 0.01; % EDFA conversion efficiency
123     Plcos = 4; % BV-OXC port consumption
124     Pcp = 300; % Control plane consumption (W)
125     Prp = 200; % Route processor consumption (W)
126     Psc = 300; % Switch control unit consumption (W)
127     PCIE = 17; % Extraction/reinsertion consumption (W)
128
129
130
131     if (OSNR(x) >= 14.5)
132         flagLDPC = 2;
133         typeofEfec = 'RS';
134     else
135         if (OSNR(x) >= 9.1 && OSNR(x) <= 14.5)
136             flagLDPC = 1;
137             typeofEfec = 'LDPC';
138         else
139             flagLDPC = 0;
140             typeofEfec = 'SemCodigo';
141         end
142     end
143 end
144 Gzero = 15 - ((4*10^6) * ((lambda - 1555*(10^-9))^2)); % Spectral EDFA gain
145
146 % —— Selecionado o Caminho —— %
147
148 fprintf('\n\n%% —— Conexao %d —— %%\n\n', x);
149
150 for j = contador:x
151
152     [caminhos, custo] = kShortestPath(Rede, origem(j), destino(j), ncaminhos);
153
154     melhorConsumoOptico = 0;
155     M = 0;
156     bw = transmissao(j);
157
158     d2max = 0.5 * ((-804.3 * log((bw * log2(2)))) + 5584.6);
159     d4max = 0.5 * ((-804.3 * log((bw * log2(4)))) + 5584.6);
160     d8max = 0.5 * ((-804.3 * log((bw * log2(8)))) + 5584.6);
161     d16max = 0.5 * ((-804.3 * log((bw * log2(16)))) + 5584.6);
162     d32max = 0.5 * ((-804.3 * log((bw * log2(32)))) + 5584.6);
163     d64max = 0.5 * ((-804.3 * log((bw * log2(64)))) + 5584.6);
164
165     bloqueio = 0;
166     for i = 1: length(caminhos)
167
168         if ((custo(i)/1e3) > d2max)
169             bloqueio = bloqueio + 1;

```

```

170         else
171             if ((custo(i)/1e3) > d4max && (custo(i)/1e3) <= d2max)
172                 M = 2;
173             end
174
175             if ((custo(i)/1e3) > d8max && (custo(i)/1e3) <= d4max)
176                 M = 4;
177             end
178
179             if ((custo(i)/1e3) > d16max && (custo(i)/1e3) <= d8max)
180                 M = 8;
181             end
182
183             if ((custo(i)/1e3) > d32max && (custo(i)/1e3) <= d16max)
184                 M = 16;
185             end
186
187             if ((custo(i)/1e3) > d64max && (custo(i)/1e3) <= d32max)
188                 M = 32;
189             end
190
191             if ((custo(i)/1e3) > 0 && (custo(i)/1e3) <= d64max)
192                 M = 64;
193             end
194
195             N = ceil(1.1*B/(log2(M)*bw*1e9));           % Numero de Slots
196             Bn = N*bw*1e9;                             % Taxa de Bit
197             Seff = log2(M);                             % Spectral efficiency e={
198                 Log2M}
199             raiz_m = ceil(sqrt(M));
200             FS = (2*Bn)/log2(M);
201
202             Eps = (4.0/(Seff*FS));                       % Parallel/ Serial conversion (J/bit)
203             Elo = 5/(Seff*FS);                          % Local oscillator consumption (pJ/bit)
204             Ecd = 324/(Seff*FS);                        % CD compensation consumption (pJ/bit)
205             Etr = 104/(Seff*FS);                        % TR consumption (pJ/bit)
206             Epmc = 246/(Seff*FS);                      % PMD compensation consumption (pJ/bit)
207             Ecr = 56/(Seff*FS);                        % Carrier recovery consumption (pJ/bit)
208
209             [linhas , colunas] = size(caminhos{i}); % Pega o numero caminhos
210             percorridos da fonte ate o destino
211             saltos = colunas - 1;
212
213             % ——— Calculo da Consumo do Transmissor ——— %
214
215             nd = 8;
216             Edac = ((4*FD*nd*FS)/Bn); % Edac is the DAC energy consumption
217             Emod = (8*Vcc*Vpp/(RT*Bn)); % Emod is the modulator energy
218                 consumption
219             Eform = (1.3/Bn);
220             pch = 2;
221             Pcw = pch.*10.^(Lmod/10);
222
223             if(flagLDPC == 1)
224
225                 Efec = (3.6/Bn); % retirado do artigo do fabio
226                 PTX = ((Bn/neo)*(Efec + Eform + Eps + Edac + Emod) + ((nt*Bn)/2)

```

```

+ Pcw);
224
225     else
226         if(flagLDPC == 2)
227
228             Efec = (0.2/Bn); % retirado do artigo do fabio
229
230             PTX = ((Bn/neo)*(Efec + Eform + Eps + Edac + Emod)+ ((nt*Bn)
                /2)+ Pcw);
231
232         else
233             Efec = 0;
234             PTX = ((Bn/neo)*(Efec + Eform + Eps + Edac + Emod)+ ((nt*Bn)
                /2)+ Pcw);
235
236     end
237
238     % ——— Calculo da Consumo do Receptor ——— %
239
240     Loss=29;
241     Prec = pch*10^(-Loss/10);
242     Eoe = ((16*Resp*Vbias*Prec)/(Seff*FS));
243
244     Cldcpc = 0.83;
245     Etia = (1.88./(Bn.*Cldcpc.*log2(2.^Seff)));
246     Eadc = Edac;
247     Edsp = (324+104+246+56+172).*(1e-9./Bn);
248
249     PRX = ((Bn/neo)*(Elo + Eoe + Etia + Eadc + Edsp));
250
251
252     % ——— Calculo da Consumo do EDFA ——— %
253
254     Pin = 2.51e-5;
255     Pout = 1e-3;
256     Psat = 39.81e-3;
257     GzeroWatts = 10^(Gzero/10);
258     Gamp = (GzeroWatts / (1 + (Pout/Psat)));
259
260     numerosDeSpam = (custo(i)/80e3);
261
262     numerosDeSpam = ceil(numerosDeSpam);
263
264     if(numerosDeSpam > 1)
265         PEDFA = 100*(numerosDeSpam)*(Pin*(Gamp -1)/(nepce));
266     else
267         PEDFA = 100*(Pin*(Gamp -1)/(nepce));
268     end
269
270     % ——— Calculo da Consumo do BV-OXC ——— %
271
272     Ptxrx = 5;
273     PBVOXC = (saltos*(Plcos + Ptxrx));
274
275     % ——— Calculo da Consumo do Control Plane ——— %
276
277     PCONTROL =(saltos*PCIE);
278
279     % ——— Calculo da Consumo no caminho optico ——— %
280

```

```

281         ConsumoOptico = (PTX + PRX + PEDFA + PBOVXC + (PCONTROL/100));
282
283         if( i == 1)
284             melhorConsumoOptico = ConsumoOptico;
285             n_saltos_menor_consumo = saltos;
286             n_spam_menor_consumo = numerosDeSpam;
287         else
288             if(melhorConsumoOptico > ConsumoOptico)
289                 melhorConsumoOptico = ConsumoOptico;
290                 n_saltos_menor_consumo = saltos;
291                 n_spam_menor_consumo = numerosDeSpam;
292             end
293         end
294
295         ConsumoOpticoTotal(j) = melhorConsumoOptico;
296     end
297
298     if(bloqueio ~= 0)
299         fprintf('\n\nPath:%d\nCaminho Bloqueiado',i);
300     else
301         fprintf('\n\nPath:%d\nOrigem:%d Destino:%d\nDistancia:%d km\nModulacao:%d\nCodigo FEC: %s\nConsumo de Energia:%f kw',i,
302             origem(j),destino(j),custo(i)/1e3,M,typeofEfec,ConsumoOptico/1e3);
303     end
304
305     if(bloqueio == ncaminhos)
306         bloqueio_final = bloqueio_final + 1;
307         bloqueio = 0;
308     else
309         bloqueio = 0;
310     end
311
312     resultado{x} = sprintf('%3.4f',sum(ConsumoOpticoTotal)/1e3);
313     resultado{x} = strrep(resultado{x},'. ','');
314     waitbar(x / numerosConexoes);
315 end
316
317 fileID = fopen(arquivoName, 'w');
318
319 fprintf(fileID, 'Simulacao Consumo de Energia/Numero de Conexoes\nEfec: %s\nValor da
320 modulacao: %d\nNumero de conexoes: %d\nNumero de Caminhos por conexao:%d\nNumero de
321 Bloqueios:%d\n\nObs:Os valores estao KiloWatts\n\n',typeofEfec,M,numerosConexoes,
322 ncaminhos,bloqueio_final);
323
324 [nrows,ncols] = size(resultado);
325
326 for row =1:nrows
327     fprintf(fileID, '%s\n',resultado{row,:});
328     fclose(fileID);
329 end
330
331 tempoExecucao = toc;
332
333 if(tempoExecucao < 60)
334     mensagem_sucesso = sprintf('Simulacao finalizada em %.0f segundos\n\n',tempoExecucao)
335     ;

```

```
334 else
335     if(tempoExecucao > 60 && tempoExecucao < 3600)
336         minutos = tempoExecucao/60;
337         segundos = mod(tempoExecucao,60);
338         mensagem_sucesso = sprintf('Simulacao finalizada em %.0f minutos e %.0f segundos\
n\n',minutos,segundos);
339     else
340         horas = tempoExecucao/3600;
341         minutos = mod(horas,60);
342         segundos = mod(minutos,60);
343         mensagem_sucesso = sprintf('Simulacao finalizada em %.0f horas, %.0f minutos e
%.0f segundos\n\n',horas,minutos,segundos);
344     end
345 end
346
347 msgbox(mensagem_sucesso, 'Simulacao');
348 delete(barra);
349
350 fprintf('\n\n');
```