

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Desenvolvimento de Técnicas Inteligentes
Visando Melhorar a Eficiência Energética
em Redes Ópticas Elásticas.

Sabi Yari Moïse BANDIRI

Itajubá, 23 de novembro de 2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Sabi Yari Moïse BANDIRI

**Desenvolvimento de Técnicas Inteligentes
Visando Melhorar a Eficiência Energética
em Redes Ópticas Elásticas.**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Microeletrônica

**Orientador: Prof. Dr. Danilo Henrique SPADOTI
Coorientador: Prof. Dr. Tales Cleber PIMENTA**

**23 de novembro de 2018
Itajubá**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Desenvolvimento de Técnicas Inteligentes
Visando Melhorar a Eficiência Energética
em Redes Ópticas Elásticas.

Sabi Yari Moïse BANDIRI

Tese aprovada por banca examinadora em 23 de
Novembro de 2018, conferindo ao autor o título de
Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Fernanda Rodrigues da Silva
Prof. Dr. Antônio Marcos Alberti
Prof. Dr. Carlos Alberto de Francisco
Prof. Dr. José Antônio Justino Ribeiro

**Itajubá
2018**



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

A N E X O I
FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Título da Tese: "Desenvolvimento de Técnicas Inteligentes Visando Melhorar a Eficiência Energética em Redes Ópticas Elásticas"

Autor: Sabi Yari Moïse Bandiri

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito		Rubrica
	A = Aprovado	R = Reprovado	
1º	A		
2º	A		
4º	A		
5º	A		
6º	A		

Resultado Médio: Conceito: A ou seja, Aprovado
Observações: _____

Itajubá, 23 de novembro de 2018

Prof. Dr. Carlos Alberto de Francisco
1º Examinador - UFSCar

Prof. Dr. Antônio Marcos Alberti
2º Examinador - INATEL

Prof. Dr. José Antônio Justino Ribeiro
4º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. Tales Cleber Pimenta
5º Examinador (Coorientador) - UNIFEI

Prof. Dr. Danilo Henrique Spadoti
6º Examinador (Orientador) - UNIFEI



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10435, de 24 de abril de 2002

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA DA TESE DE
DOUTORADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Eu, Prof.^a Dr.^a **Fernanda Rodrigues da Silva**, 3^a Examinadora (por Videoconferência) da banca de Tese de Doutorado do aluno **Sabi Yari Moïse Bandiri**, intitulada "Desenvolvimento de Técnicas Inteligentes Visando Melhorar a Eficiência Energética em Redes ópticas Elásticas", após o julgamento da Tese, atribuo o seguinte conceito:

JULGAMENTO

Examinador	Conceito		Rubrica
	A = Aprovado	R = Reprovado	
3 ^a	A		

Observações:

- (1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
- (2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
- (3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Tese.

Autorizo o presidente da banca, Prof. Dr. Danilo Henrique Spadoti, a assinar por mim a Ata da Defesa de Tese.

Itajubá, 23 de novembro de 2018

Prof.^a Dr.^a **Fernanda Rodrigues da Silva**
3^a Examinadora – UNIFEI

Sabi Yari Moïse BANDIRI

Desenvolvimento de Técnicas Inteligentes Visando Melhorar a Eficiência Energética em Redes Ópticas Elásticas / Sabi Yari Moïse BANDIRI. – Itajubá, 31 de Outubro de 2018-

81 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr Danilo Henrique SPADOTI

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

Faculdade de Engenharia Elétrica

Programa de Pós-Graduação, 31 de Outubro de 2018.

1. Palavra-chave1. 2. Palavra-chave2. I. Orientador. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Faculdade de Engenharia Elétrica. IV. Título

CDU 02:141:005.7

Ao meu Filho Lucas Yari
&
Minha Avó Yon Guido in Memoria

Agradecimentos

Em primeiro lugar, dou graças a Deus pela sua imensa bondade e graça na minha vida sem a qual eu não terei chegado aqui.

Agradeço aos meus pais Gnon Séssou e Amos Bani BANDIRI os quais desde criança me ensinaram a ter temor a Deus, acreditaram nos meus sonhos e sempre me apoiaram para alcançá-lo.

Ao meu orientador Prof. Danilo H. SPADOTI não apenas pela constante orientação neste trabalho, mas sobretudo pelo tempo dedicado, conhecimento compartilhado e sua amizade, paciência.

Ao Prof. Dr Tales C. PIMENTA pelos conselhos, as oportunidades que me ofereceu e ainda pela sua orientação.

Ao Prof. Dr José A.J. RIBEIRO apresento meus sinceros agradecimentos pelos conselhos, companheirismo.

A UNIFEI, o Reitor, os funcionários e principalmente a todos os professores do departamento de Microeletrônica meus sinceros agradecimentos.

Ao Prof. Dr Fábio R. Durand pela disponibilização do seu código de Matlab para poder inicializar este projeto e também pelas contribuições.

Aos meus amigos Daniely Gomes Silva, Enock Ogoulola, colegas do LABTEL e de Microeletrônica, agradeço a parceria e sempre serão lembrados.

Aos meus irmãos Darius, Rachel, Lydia, Dorcas e Eunice BANDIRI, imenso agradecimentos. Ao meu Primo GUERA Ouorou Gani Mariel e sua esposa Mariam. Agradeço ao governo Brasileiro e às instituições CAPES, FAPEMIG, CNPQ. Agradeço também meus irmãos da fé, pastores tanto no Brasil, Cuba, Benin, Espanha e outros países que esqueci de mencionar. Finalizo agradecendo a minha amada esposa Syntia R.R.de SOUZA pelo seu amor, compreensão e apoio ao longo destes anos e sempre ter jogado o papel de Pai e Mãe nas minhas ausências para a educação de nosso filho Lucas Yari.

Que Deus abençoe a cada um de vocês.

*“L’éducation est la meilleure,
héritage qu’un père peut laisser,
à ses enfants.”
(Bani BANDIRI)*

Resumo

Reduzir os gastos energéticos em redes de comunicação tem sido um dos grandes desafios enfrentados nos últimos anos. Este trabalho de tese apresenta novas estratégias para a redução de consumo de energia e melhoramento da eficiência energética em redes ópticas. Estas estratégias baseiam-se na alocação e alteração dos parâmetros da rede óptica de forma mais eficiente (ex: modulação, codificação) em função das condições do canal óptico. Neste trabalho, primeiro, foi investigada a técnica de modulação adaptativa (*Adaptive Modulation* - AM), onde o nível de símbolos no esquema de constelação de uma modulação é alterado de acordo à distância óptica e o número de *slots* considerada. Assim, foi possível garantir a qualidade de transmissão (*Quality of Transmission* - QoT) durante o processo de roteamento e alocação do espectro da rede. A segunda técnica proposta utiliza um código adaptativo. O código corretor de erro (*Forward Error Correction* - FEC) a ser implementado na rede varia como função da relação sinal ruído óptico (*Optical Signal to Noise Ratio* - OSNR) e do número de *slots* também. Finalmente, é proposta uma técnica híbrida, a qual é uma combinação das duas estratégias mencionadas anteriormente (modulação adaptativa e código adaptativo). Neste caso, os parâmetros de modulação e o tipo de código são alterados simultaneamente. Os resultados analíticos demonstraram que o consumo energético é reduzido, a eficiência da rede é melhorada e a probabilidade de bloqueio é diminuída.

Palavras-chaves: Rede Óptica Elástica, Modulação Adaptativa, FEC Adaptativo, Eficiência Energética.

Abstract

Reducing energy consumption on communication networks has been one of the major challenges faced in recent years. This thesis presents new strategies aiming to reduce energy consumption and improve energy efficiency in optical networks. These strategies are based on the allocation and alteration of optical network parameters more efficiently (eg: modulation, coding, bandwidth etc.) as a function of optical channel conditions. In this work, we first investigated the Adaptive Modulation (AM) technique, where the level of symbols in the constellation scheme of a modulation is changed according to the optical distance and the number of slots. Thus, it was possible to guarantee the quality of transmission (QoT) during the process of routing and spectrum assignment in the network. The second proposed technique uses an adaptive code. The Forward Error Correction (FEC) code to be implemented in the network varies as a function of the Optical Signal to Noise Ratio (OSNR) and the number of slots. Finally, a hybrid technique is proposed, which is a combination of the two previously mentioned strategies (adaptive modulation and adaptive code). In this case, the modulation parameters and the code type are changed simultaneously. The analytical results demonstrated that the energy consumption is reduced, the efficiency of the network is improved and the blocking probability is decreased.

Key-words: Elastic Optical Network, Adaptive Modulation, Adaptive FEC, Energy Efficiency.

Résumé

La réduction des consommations d'énergie sur les réseaux de communication a été l'un des principaux défis rencontrés ces dernières années. Cette thèse présente de nouvelles stratégies pour réduire la consommation d'énergie et améliorer l'efficacité énergétique dans les réseaux optiques. Ces stratégies reposent sur une attribution et une modification plus efficaces des paramètres de réseau optique (par exemple, modulation, codage, largeur de bande, etc.) en fonction des conditions du canal optique. Dans ce travail, nous avons d'abord étudié la technique de modulation adaptative (*Adaptive Modulation* - AM), où le niveau de symbole dans le schéma de constellation d'une modulation est modifié en fonction de la distance optique et le nombre de *slots* considérée. Ainsi, il est possible de garantir la qualité de transmission (*Quality of Transmission* - QoT) lors du processus de routage et d'allocation du spectre du réseau. La deuxième technique proposée utilise un code adaptatif. Le code de correction d'erreur directe (*Forward Error Correction* - FEC) à mettre en œuvre dans le réseau varie en fonction du rapport signal optique / bruit (*Optical Signal Noise to Ratio* - OSNR) et le nombre de *slots*. Enfin, il est proposé une technique hybride, qui est une combinaison des deux stratégies mentionnées ci-dessus (modulation adaptative et code adaptatif). Dans ce cas, les paramètres de modulation et le type de code sont modifiés simultanément. Les résultats analytiques ont démontré que la consommation d'énergie est réduite, l'efficacité du réseau est améliorée et la probabilité de blocage est diminuée.

Mots-clés : Réseau Optique Résilient, Modulation Adaptative, FEC Adaptif, Efficience Énergétique.

Resumen

Reducir los gastos de energía en las redes de comunicación ha sido uno de los grandes desafíos de la investigación en los últimos años. Esta tesis presenta nuevas estrategias para reducir el consumo de energía y mejorar la eficiencia energética en redes ópticas. Estas estrategias se basan en la asignación y modificación de los parámetros de la red óptica de forma más eficiente (por ejemplo, modulación, codificación, ancho de banda, etc.) en función de las condiciones del canal óptico. Por un lado, para la técnica de modulación adaptativa implementada en este trabajo, el nivel de símbolo en el esquema de constelación de una modulación es modificado de acuerdo con la distancia óptica y el número de *slots* considerada, garantizando la calidad de la transmisión (*Quality of Transmission* - QoT) para cualquier solicitud de conexión. Por otro lado, para la técnica de código adaptativo, el tipo de código de corrección de avance (FEC) que se implementa en la red varía en función de la relación señal de ruido óptico (*Optical Signal to Noise Ratio* - OSNR) y el número de *slots*. Finalmente, se propone una técnica híbrida, que es una combinación de las dos estrategias mencionadas anteriormente (modulación adaptativa y código adaptativo). En este caso, los parámetros de modulación y el tipo de código se cambian simultáneamente. Los resultados analíticos han demostrado que el consumo de energía se reduce, la eficiencia de la red se mejora y la probabilidad de bloqueo disminuye

Palabras claves: Red Óptica Elástica, Modulación Adaptativa, FEC Adaptativo, Eficiencia Energética.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Evolução do consumo de energia nas redes de telecomunicações [2].	8
Figura 2 – Consumo de energia nos setores de TIC.	9
Figura 3 – Comparação entre os caminhos ópticos com grade fixa e flexível.	11
Figura 4 – Exemplo simples de RSA.	13
Figura 5 – Alocação fixa de espectro.	16
Figura 6 – Alocação semi-elástico do espectro.	17
Figura 7 – Alocação elástica do espectro com expansão e redução.	17
Figura 8 – Esquema de constelação das modulações BPSK, QPSK e 16QAM.	18
Figura 9 – Diagrama de bloco do sistema de transmissão baseado em OFDM para caminho óptico fim a fim.	25
Figura 10 – Alcance de transmissão versus taxa de <i>bits</i>	28
Figura 11 – Máxima distância de transmissão versus taxa de modulação.	29
Figura 12 – Número de <i>slots</i> versus largura de banda requerida.	30
Figura 13 – Topologia da rede dos Estados Unidos.	38
Figura 14 – Topologia da rede Alemã.	38
Figura 15 – Caminho óptico para alocação de modulação adaptativa.	39
Figura 16 – Número de <i>slots</i> utilizado por cada modulação para uma $Bw_i = 46$ GHz.	40
Figura 17 – Algoritmo LMA(<i>Lower Modulation Assignment</i>) para escolha da modulação ótima.	42
Figura 18 – Algoritmo AM-RSA para melhorar o desempenho da rede óptica elástica.	45
Figura 19 – Consumo de energia em função de número de conexões para MPSK e MQAM usando a rede Alemã.	46
Figura 20 – Eficiência de energia para cada formato de Modulação.	46
Figura 21 – Consumo de energia em função do pedido de conexão para TR = 50; 100 e 200Gbps.	47
Figura 22 – Consumo de energia em função de número de conexões AM-RSA, SP-RSA e MH-RSA.	48
Figura 23 – Eficiência de energia em função de número de conexões para os algoritmos SP, MH e AM-RSA.	49
Figura 24 – Consumo de energia versus potência de excitação do amplificador EDFA.	49
Figura 25 – Consumo de energia em função do tempo para o algoritmo SP, MH e AM-RSA.	50
Figura 26 – Probabilidade de bloqueio em função de número de conexões AM-RSA e mAdap.	51
Figura 27 – Eficiência energética para N_i demanda de conexão para os algoritmos <i>mAdap</i> e <i>AM-RSA</i>	52
Figura 28 – Caminho óptico para alocação de FEC adaptativo.	53

Figura 29 – Algoritmo LFEC para escolha do melhor tipo de FEC.	56
Figura 30 – Algoritmo AFEC-RSA para melhorar o desempenho da rede óptica elástica.	57
Figura 31 – Consumo de energia em função da carga da rede.	58
Figura 32 – Consumo de energia em função da capacidade de correção de erro t.	58
Figura 33 – Eficiência de energia em função do pedido de conexão para os algoritmos SP, MH e AFEC-RSA.	59
Figura 34 – Probabilidade de bloqueio em função do pedido de conexão para os algoritmos AFEC-RSA, MH e SP.	59
Figura 35 – Algoritmo AMC-RSA para melhorar o desempenho da rede óptica elástica.	61
Figura 36 – Consumo de energia por <i>bit</i> de informação versus comprimento do percurso para os três diferentes algoritmos AMC-RSA, SP e MH.	62
Figura 37 – Probabilidade de bloqueio para os algoritmos AMC-RSA, SP e MH.	62

Lista de tabelas

Tabela 1 – Informações sobre as três gerações de código FEC.	22
Tabela 2 – Comparação do desempenho de cada modulação em termo de eficiência espectral, número de slots e MDT.	30
Tabela 3 – Número de <i>slots</i> em diferentes frequência requerida para as modulações $M - PSK$ e $M - QAM$	41
Tabela 4 – Eficiência de energia para diferentes Modulações.	47
Tabela 5 – Tabela comparativa da largura de banda requerida, OSNR e consumo total de energia para os algoritmos mAdap e AM-RSA.	51

Lista de abreviaturas e siglas

AFEC-RSA	Adaptive Forward Error Correction Routing and Spectrum Allocation
AM-RSA	Adaptive Modulation Routing and Spectrum Allocation
AMC-RSA	Adaptive Modulation and Code 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
IFFT	Inverse Fast Fourier Transformation
LFEC	Lower Forward Error Correction
LMA	Lower Modulation Assignment
LDPC	Low-Density Parity-Check LDPC
LO	Local Oscillator
MDT	Maximum Distance Transmission
MPSK	Multiple Phase-Shift Keyed
MZ	Mach-Zehnder

NCG	Net Coding Gain
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
RS	Reed-Salomon
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

Lista de símbolos

ϵ_{mod}	Eficiência de largura de faixa
E_b/N_o	Relação Energia de Bit por Ruído
P_{BPSK}	Probabilidade de Erro de bit da Modulação BPSK
B	Largura de faixa do canal
P_e	Probabilidade de erro de símbolo
P_b	Probabilidade de erro de bit
n	Número total de bit
k	Bits de informação
t	Capacidade de Correção de Erro
D	Parâmetro de dispersão
β	Dispersão do grupo de velocidade
λ	Comprimento de onda
$\Delta\lambda$	Espaçamento do canal
γ_N	Coefficiente de não-linearidade da fibra
α	Coefficiente de perda da fibra
L_s	comprimento do <i>span</i>
h	Constante de Planck
ν	Frequência da luz
$N_{node,i}$	Penalidade da potência do ruído BV-OXC
N_c	Números de canais

Sumário

1	INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1	Objetivos	4
1.2	Contribuição e Organização do trabalho	4
1.3	Publicações	6
1.3.1	Publicados	6
1.3.2	Em Revisão	6
 Capítulo 2		8
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	8
2.1	Estado da Arte	8
2.2	O Problema de Roteamento e Alocação de Espectro	12
2.2.1	Os Tipos de RSA e suas Variantes:	12
2.2.1.1	O Problema de Roteamento	12
2.2.1.2	O problema da Alocação de Espectro..	14
2.3	Comunicação Digital	18
2.3.1	Modulação Adaptativa	18
2.3.2	Código de Correção de Erro	20
2.3.3	Capacidade de Correção de Erros dos Códigos de Blocos	20
2.3.4	Códigos BCH (Bose, Chaudhuri e Hocquenghem)	21
2.3.5	Código FEC em Comunicação Óptica	21
2.3.5.1	Evolução dos Códigos FEC	22
2.4	Conclusão	23
 Capítulo 3		25
3	MODELO DE CONSUMO DE ENERGIA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	25
3.1	O-OFDM em Rede Óptica Elástica	25
3.2	Escolha de Modulação e Código FEC	26
3.3	Consumo de Energia e Eficiência Energética	31
3.3.1	Consumo de Energia	31
3.3.1.1	Consumo de Energia no Transmissor	31
3.3.1.2	Consumo de Energia no Receptor	33
3.3.1.3	Consumo de Energia no Amplificador EDFA	33
3.3.2	Eficiência Energética em Rede Óptica Elástica	34

Capítulo 4	37
4	ROTEAMENTO E ALOCAÇÃO DE ESPECTRO 37
4.1	Topologias de Redes 37
4.2	Modulação Adaptativa em Rede Óptica Elástica 38
4.2.1	Análise de Desempenho dos Algoritmos AM-RSA, MH e SP 47
4.2.2	Análise de Desempenho dos Algoritmos AM-RSA e mAdap 50
4.3	FEC Adaptativo em Rede Óptica Elástica 52
4.4	Técnica Híbrida em Redes Ópticas Elásticas 60
	Conclusão 63
	Referências 65
	APÊNDICES 72
	ANEXOS 76
	ANEXO A – PARÂMETROS DO ENLACE DA FIBRA ÓPTICA . . . 77
	ANEXO B – VARIÁVEIS DO CONSUMO DE ENERGIA 78

CAPÍTULO 1

1 Introdução Geral

O rápido crescimento das tecnologias de informação e de comunicação (TIC) tem causado um aumento do consumo de energia em esfera mundial [1–3]. Com base nas estimativas, o consumo de energia das TIC representou aproximadamente os 4% do consumo global de energia em 2009 e vem crescendo 8% ao ano [4]. As redes sem fio consomem menos energia que as redes cabeadas. Nestas últimas, 70% de consumo é destinado ao segmento de usuários finais, enquanto apenas 30% estão orientados para os operadores [1, 3]. Assim, o crescimento previsto do tráfego fará com que o consumo de energia torne-se um problema significativo para os operadores. Além disso, esse aumento no consumo de energia não é só econômico (despesas operacionais e de capital de operadores das telecomunicações), mas também implicações ecológicas, devido ao crescimento de uso de carbono do setor de telecomunicações.

Na atualidade, o setor das TIC é responsável pela produção de 2-2,5% das emissões globais de gases de efeito estufa, conforme estimado pela União Internacional de Telecomunicações (UIT) [5]. Neste contexto, o planejamento e operação de redes eficientes energeticamente está se tornando uma grande necessidade. Diversos estudos abordaram estratégias de melhoramento da eficiência de energia e a redução dos gastos energéticos [4, 6, 7]. No entanto, a implementação de redes ópticas elásticas eficientes energeticamente sem comprometer a qualidade de serviço e a qualidade de serviço continua sendo um grande desafio.

A multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing* - WDM) apareceu como uma técnica promissora para melhorar o desempenho da rede óptica [6, 7]. Nesta tecnologia, o espectro é dividido em largura de banda fixa impondo taxas de transmissão rígidas de 50 GHz em cada comprimento de onda que transmite alta taxa de bits com canais operando entre 40 Gbps a 100 Gbps [8]. Isto, em última instância, reduz a eficiência na utilização dos recursos, gerando muitas vezes subutilização ou super-provisionamento dos mesmos devido às diferentes granularidades de demanda geradas nas camadas dos clientes. Adicionalmente, na tecnologia WDM estão presentes algumas limitações críticas da camada física, tais como: espaçamento de densidade de canal, diferentes efeitos não-lineares (Raman e Brillouin), mistura de quatro ondas (*Four-Wave Mixing* - FWM), modulação cruzada de fases (*Cross Phase Modulation* - XPM), automodulação de fases (*Self Phase Modulation* - SPM) entre outras [9].

Na conferência europeia sobre comunicação óptica, que aconteceu no ano 2009 em Viena - Áustria, Lange *et al.* publicaram um trabalho sobre o impacto das TICs no consumo de energia global. Eles terminam o trabalho com a seguinte conclusão: "*Espera-se que a alocação adaptativa de recursos de rede seja uma abordagem promissora para melhorar a eficiência energética das redes de telecomunicações*"[2]. A partir daí nasce no mesmo ano o novo conceito

chamado rede óptica elástica (*Elastic Optical Network* - EON) introduzido por Jinno *et al.* [10]. O propósito desta tecnologia de futura geração é de aproveitar melhor os recursos espectrais, levando a satisfazer a demanda dos usuários em questão de qualidade de serviço, qualidade de transmissão e amenizar o consumo crescente de energia. Além disso, esta tecnologia foi proposta como uma forma de atribuir de forma dinâmica a largura de banda ao caminho óptico (referido como *lightpath* em inglês) com base nas suas taxas necessárias de transmissão [8]. Quando uma nova conexão é solicitada, a EON considera a implementação mais eficaz do formato de modulação, correção automática de erro (*Forward Error Correction* - FEC) e espectro gerando a solução de menor custo. Esta decisão se baseia no comportamento adaptativo ajustando-se com base nas condições reais do enlace.

Nas redes que usam a tecnologia WDM, o problema de alocação de recursos é conhecido como roteamento e alocação de comprimentos de onda (*Routing and Wavelength Assignment* - RWA) [11]. Nelas, um caminho óptico ocupa o mesmo comprimento de onda em todos os enlaces de fibra, conhecido como restrição de continuidade de comprimento de onda. Como consequências, ocorrem altas probabilidades de bloqueio e incapacidade de lidar com situações de falha. Na rede EON, este problema é chamado de roteamento e alocação de espectro (*Routing and Spectrum Allocation* - RSA) [12, 13]. Nesta tecnologia, é alocada uma porção do espectro (ou um conjunto) de *slots* para atender a demanda de tráfego. O RSA é diferente e mais desafiador do que o problema RWA, principalmente pelo fato dos caminhos ópticos poderem utilizar diferentes granularidades espectrais [8]. Em uma rede sem conversão espectral, a porção do espectro alocada para a conexão deve ser mantida ao longo dos enlaces da rota de forma contínua. Adicionalmente, em RSA, cada caminho óptico deve seguir as restrições de continuidade e contiguidade de espectro, onde a continuidade de espectro significa que o caminho óptico deve ser atribuído ao mesmo conjunto de *frequency slots* (FSs) em todos os enlaces de fibra atravessados e a contiguidade de espectro significa que os FSs que compõem o espectro de um caminho óptico devem ser espectralmente adjacentes [13].

Melhorar o desempenho de uma rede óptica elástica sem afetar a qualidade de transmissão, qualidade de serviço continua sendo um desafio. Alguns autores consideraram a distância de transmissão como o único fator da qualidade de transmissão (*Quality of Transmission* - QoT) de interesse em redes ópticas elásticas [9, 14]. O formato de modulação aplicável com QoT aceitável é determinado em função da distância de alcance. No entanto, a máxima distância de transmissão depende de muitos fatores tais como: perda de fibra e limites da relação sinal-ruído óptico (*Optical Signal-to-Noise Ratio* - OSNR) [9]. Por este motivo, outros autores parâmetros como OSNR na análise de desempenho das redes ópticas elásticas [15, 16].

Wan *et al.* introduziram o referido algoritmo *mAdap* baseado na modulação adaptativa. Eles demonstraram que o algoritmo baseado na adaptação do formato de modulação é adequado para encontrar a solução ótima para o problema de RSA. Seu algoritmo *mAdap* usa uma iteração para encontrar a ordem do nível de modulação de acordo com o alcance óptico [17].

Convencionalmente, o formato de modulação com maior número de símbolos, como 64QAM (*Quadrature Amplitude Modulation* - QAM), é atribuído à distância mais curta e aquele com menor número de símbolo, como BPSK (*Binary Phase Shift Keying* - BPSK), é atribuído à maior distância [17–19]. Talvez essa suposição seja compatível com a linha de pensamento que diz que a modulação de maior nível conduz a um menor custo de *slots* de espectro. No entanto, foi descoberto que diferentes demandas de largura de banda podem resultar no mesmo custo de *slot* de frequência para vários níveis de modulação. Assim, a suposição acima deve ser reconsiderada, pois modulações de níveis inferiores têm melhor eficiência energética, maior alcance de transmissão e menor taxa de erro de *bit*, etc.

O código de correção antecipada de erros (*Forward Error Correction* - FEC) é bastante empregado nos sistemas de comunicações ópticas para compensar a degradação do sinal no receptor e ainda proporciona benefícios tais como baixo custo de investimento no *hardware* e ótimo desempenho nas correções de erros. O princípio de operação é o seguinte: os *bits* de redundâncias são acrescentados aos *bits* de informação antes da modulação e da transmissão do sinal. Por isso, o ganho de codificação total (*Net Coding Gain* - NCG) de um código FEC está diretamente relacionado ao cabeçalho (*overhead*). A estratégia de alocação fixa do FEC (ou uniforme) aloca o melhor FEC (ou seja, o FEC com maior NCG) para atender adequadamente ao caminho óptico com a relação sinal ruído óptico (*Optical Signal-to-Noise Ratio* - OSNR) mais baixo em toda a rede. Este mesmo FEC é utilizado em *lightpaths* com OSNRs mais elevadas, onde tais altas NCGs podem não ser necessários. Consequentemente, o desempenho da rede é reduzido em termo de eficiência espectral, taxa de bloqueio, etc.

Shen *et al.* introduziram o conceito de FEC adaptativo em rede óptica, primeiro em rede que usa a multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength-division Multiplex* - WDM) e logo em rede óptica elástica (*Elastic Optical Network* - EON). A estratégia de alocação FEC adaptável supera significativamente a estratégia de alocação com FEC fixa, tanto em termos de redundância de capacidade sobressalente quanto de cabeçalho médio de codificação FEC necessária por canal óptico. No processo de adaptação eles atribuíram o FEC tipo 3 (Códigos de verificação de paridade de baixa densidade (*Low-Density Parity-Check* - LDPC) para o caminho óptico que tem o menor OSNR e o FEC tipo 1 (*Reed–Solomon* - RS) para caminho óptico com maior OSNR [16, 20]. Esta suposição é feita tal vez porque o FEC tipo 3 possui maior ganho de codificação total e maior cabeçalho enquanto o FEC tipo 1 possui menores ganho de codificação total e cabeçalho. Esta consideração é apenas válida quando a potência de excitação do amplificador óptico e a largura de banda utilizada são constantes. Isso não reflete completamente o caráter flexibilidade das redes ópticas elásticas. Por tanto, uma nova estratégia que explora as virtudes das redes ópticas elásticas precisa ser implementada.

Neste contexto, propõe-se uma nova forma de alocação de modulação e codificação em redes ópticas elásticas visando reduzir o consumo de energia e melhorar a eficiência de energia. As modulações e codificações empregadas em toda a rede são alteradas dinamicamente como

uma função das condições do canal óptico visando melhorar o desempenho das redes ópticas elásticas. A métrica de análise abordará também o caminho com menor consumo de energia.

1.1 Objetivos

- Desenvolver novas técnicas de alocação de modulação e codificação, com o intuito de reduzir o consumo e melhorar a eficiência energética de redes ópticas elásticas.

Para isso, os seguintes objetivos secundários foram traçados:

- Propor um novo esquema de alocação de modulação e ou codificação em redes ópticas elásticas.
- Desenvolver um algoritmo baseado em modulação adaptativa para redes ópticas elásticas.
- Desenvolver um algoritmo baseado em Codificação adaptativa para redes ópticas elásticas.
- Desenvolver uma técnica híbrida como combinação dos esquemas de modulação e codificação adaptativa para redes ópticas elásticas.

1.2 Contribuição e Organização do trabalho

Este trabalho propõe novas estratégias de alocação do formato de modulação e ou de codificação de forma adaptativa visando melhorar a eficiência de energia em redes ópticas elásticas. Os critérios de decisão para a adaptação são: a distância óptica ($d_{i_{max}}$), a relação sinal ruído óptico ($OSNR_i$) e o número de *slot* necessário por pedido de conexão. Para alcançar os objetivos traçados, foram desenvolvidos cinco diferentes algoritmos como contribuição deste trabalho de tese, que são:

1. **LMA** (*lower modulation assignment*): algoritmo que permita a escolha da modulação de forma mais eficiente.
2. **AM-RSA** (*adaptive modulation routing spectrum allocation*): algoritmo baseado na modulação adaptativa visando minimizar o consumo de energia em rede óptica elástica.
3. **LFEC** (*lower FEC*): algoritmo para selecionar o tipo de código FEC de forma eficiente.
4. **AFEC-RSA** (*adaptive forward error correction routing spectrum allocation*): algoritmo baseado na alocação adaptativa do tipo de código FEC visando melhorar a eficiência de energia.

5. **AMC-RSA** (*adaptive modulation and code routing spectrum allocation*): algoritmo baseado na combinação das técnicas de modulação e codificação adaptativa para melhorar a eficiência de energia.

O presente trabalho de tese é dividido em quatro capítulos. Capítulo 2 apresenta os conceitos teóricos sobre a comunicação em redes de fibra óptica. Será abordado um estudo sobre as tecnologias baseadas na multiplexação e divisão de comprimento de onda. Além disso o problema de roteamento e alocação de espectro chamado de *routing spectrum assignment* - (RSA). No Capítulo 3 discute-se o modelo de consumo de energia e eficiência energética em redes ópticas elásticas e a forma de calcular o consumo de energia para qualquer tipo de rede é descrita passo por passo. As novas estratégias para redução de consumo de energia e melhoramento da eficiência energética são apresentadas no Capítulo 4. É evidenciado neste capítulo, o estudo do desempenho destas estratégias em comparação a outras apresentadas na literatura. Finalmente, são apresentadas as conclusões, assim como as sugestões para trabalhos futuros no Capítulo 5.

1.3 Publicações

Como fruto das pesquisas feitas ao longo deste trabalho, foram publicados os seguintes artigos em revista e congresso:

1.3.1 Publicados

Revista:

1 - S.Y.M. BANDIRI, R.M.S. BRAGA and D.H. SPADOTI "*Analytical Comparison of the Performance of Adaptive Modulation and Coding in Wireless Network Under Rayleigh Fading*" Journal of Microwave and Optoelectronics, Vol. 16, No. 3, September 2017, pp:719-731,

2 - BANDIRI, S.Y.M., PIMENTA, T.C. and SPADOTI, D.H., 2018. *Adaptive Modulation and code Strategy to Reduce Energy Consumption in Elastic Optical Network*. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMoe), 17(1), pp.65-84.

Congresso:

1 - S.Y.M. BANDIRI, R.M.S. BRAGA, T.C. PIMENTA and D.H. SPADOTI, "*Energy Consumption Improvement based on Distance Adaptive Modulation in Elastic Optical Network*", 17th ICCDCS – Cozumel, Mexico, 2017, pp:29-32 .

2 - S.Y.M BANDIRI, F.R.R. MARANTE, T.C. PIMENTA and D.H. SPADOTI "*Energy Consumption Improvement based on Adaptive FEC Code in Elastic Optical Network*" 9th IEEE Latin American Symposium on Circuits and Systems - LASCAS 2018.

3- S.Y.M. BANDIRI, T.A.R. Morales, F.R.R. MARANTE, T.C. PIEMENTA, D.H. SPADOTI, *Energy Efficiency Improvment Based on Adaptive Modulation in Elastic Optical Network*, VIII Simposio de Telecomunicaciones, Habana, Cuba. March 19th to 23th, 2018.

4- S.Y.M. BANDIRI, T.C. PIMENTA, D.H.SPADOTI, *Optimization of Energy consumption and Bandwidth used in elastic optical network* International Conference on Microeletronics, Tunisia 2018 ⁴.

1.3.2 Em Revisão

REVISTA:

New Approach to Improve Energy Efficiency in Elastic Optical Network, *IEEE Communications Letters*

⁴ Trabalho aceito para ser publicado

CAPÍTULO 2

2 Fundamentos Teóricos

2.1 Estado da Arte

A atual sociedade foi transformada drasticamente pelo rápido crescimento das tecnologias da informação e de comunicação - TIC (exemplos: comércio eletrônico, teletrabalho, tele e videoconferência). Isso abriu várias oportunidades reduzindo o impacto humano sobre a natureza (reduzindo as viagens a nível mundial de pessoas e bens) [8]. No entanto, a penetração das TIC em nossas vidas diárias tem uma desvantagem, já que o consumo mundial de energia está crescendo abruptamente anos após anos. O consumo global de energia dos equipamentos TIC está crescendo de forma exponencial, de 156 GW em 2007 para cerca de 430 GW em 2020 [2, 4].

A Fig.1 relata uma previsão do crescimento do consumo de energia (em porcentagem) de redes de telecomunicações dos últimos anos [2, 21]. Observa-se que o consumo global de energia dobrou entre os anos 2009 a 2017. A expectativa é que este consumo de energia tenha um crescimento muito mais rápido com o advento do chamado Internet das coisas (Internet of Things - IOT).

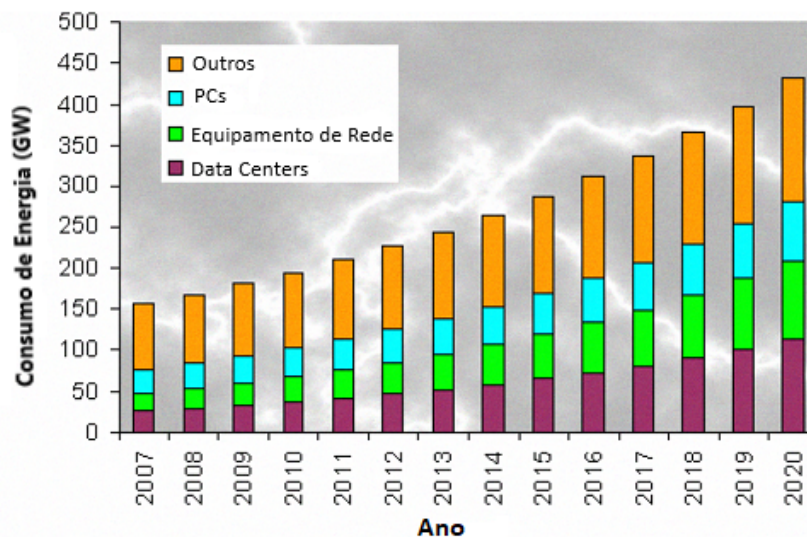


Figura 1 – Evolução do consumo de energia nas redes de telecomunicações [2].

A Fig.2 apresenta o consumo de energia dos diferentes setores das TIC [1]. Observa-se que quase 50% (incluindo a operação de servidores) é devido à operação de redes de telecomunicações. Estas podem ser redes móveis, rede local sem fios (*Wireless Local Area Network - WLAN*), rede de área local (*Local Area Network - LAN*) e redes de linha fixa [5]. Considerando o crescimento do preço da energia (esperado com o declínio da disponibilidade barata de combustíveis fósseis) e a crescente preocupação com o Efeito de *Green House* que está

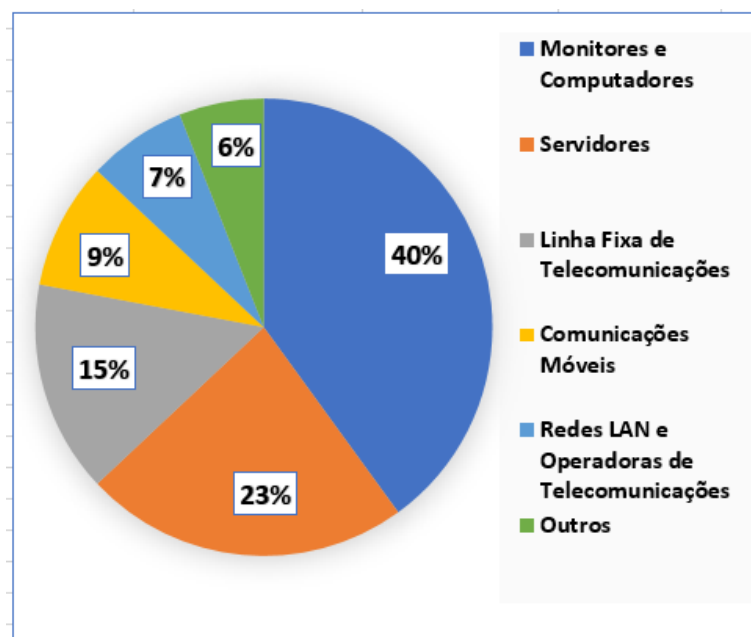


Figura 2 – Consumo de energia nos setores de TIC.

sendo discutida nas políticas governamentais, o consumo de energia das TIC já está levantando diversas preocupações e é imperativo que sejam desenvolvidas soluções energeticamente eficientes [1]. Precisa-se criar novas estratégias e paradigmas de rede para que as TIC mantenham o mesmo nível de funcionalidade, ao mesmo tempo que consumam uma quantidade menor de energia no futuro.

O uso de sistema de comunicação óptica, em que as frequências das portadoras são em torno de 200 THz, ofereceu um aumento na capacidade de transporte de informação por um fator de até 1×10^4 vezes, em comparação com sistemas de micro-ondas [8]. Além disso, o uso da técnica de multiplexação por divisão densa de comprimentos de onda (*Dense Wavelength-division Multiplexing* - DWDM) junto com amplificadores ópticos conduz à redução do custo total e ao mesmo tempo, ao aumento da capacidade de sistemas. Apesar destes benefícios, a tecnologia DWDM enfrenta barreiras para atender as crescentes demandas de tráfego da Internet, pois sofre com limitações físicas que impõem a transmissão de taxas fixas em cada comprimento de onda, reduzindo a eficiência na utilização dos seus recursos [11].

Nos últimos anos, tem crescido a necessidade de implementar um novo tipo de rede óptica em que a grade de comprimento de onda não é fixa e que a largura de banda dos caminhos ópticos seja flexível, ou seja, possa expandir-se e reduzir-se dinamicamente de acordo com as condições do canal óptico e as requisições do usuário. Este tipo de rede é chamado de rede óptica elástica (*Elastic Optical Network* - EON), ideia introduzida em 2009 por Jinno Masahiko *et al.* em [10]. Quando um novo pedido de conexão é solicitado, a EON considera a melhor implementação do pedido, em termos de formato de modulação, correção de erro por encaminhamento (*Forward Error Correction* - FEC) e espectro, produzindo a solução de menor custo. Esta decisão se baseia em comportamentos adaptativos que se ajustam conforme as condições reais do enlace e no

conhecimento do plano de controle das limitações na rede.

Para alocação de recursos de espectro em uma rede EON é necessário encontrar uma rota e atribuir à mesma uma quantidade contígua de *slots* espectrais [22]. Este problema é chamado de Roteamento e Alocação de Espectro (*Routing and Spectrum Assignment* - RSA). Recentemente, esse problema evoluiu para o chamado nível de modulação roteamento e alocação de espectro (*Routing Modulation Level and Spectrum Allocation* - RMLSA) que adiciona a atribuição do formato de modulação ao espectro nas redes ópticas [23]. Por fim, Wan *et al.* investigaram os efeitos nos algoritmos RSA ao usar a modulação adaptativa e propuseram os algoritmos *m* adaptáveis RSA, chamados *mAdap*, que interagem através de possíveis modulações, em ordem decrescente, aplicando o algoritmo RSA até que uma solução seja encontrada [17].

Diversos algoritmos para a alocação de recursos em redes EON têm sido propostos na literatura [8, 10, 23, 24], demonstrando a eficácia do novo paradigma e sua viabilidade. As redes EON possuem a característica de dividir os recursos espectrais em faixas de frequência na forma de subportadoras, permitindo múltiplos formatos de modulação e taxas de dados e espectro de tamanhos variados [25]. O objetivo de uma EON é alocar uma demanda a determinado caminho óptico que possua uma largura de banda óptica com um tamanho apropriado. A Fig.3 apresenta as diferenças entre os caminhos ópticos com grade fixa e flexível. Por um lado, na grade fixa (Fig.3a) a faixa de frequência do espectro utilizado é única, independentemente da demanda requisitada pelo cliente. Na grade flexível (Fig.3b), essa faixa de frequência é adaptável de acordo com a demanda requisitada.

Usando a tecnologia óptica de multiplexação por divisão de frequências ortogonais (*Optical Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* - O-OFDM) a largura do canal é dividida em diversas subportadoras que enviam dados independentes (por exemplo a modulação de amplitude em quadratura (*Quadrature Phase Shift Keying* - QPSK) com 4 subportadoras) (Fig.3b). As subportadoras compactam o domínio da frequência, assim, os sinais de cada portadora se estendem para as adjacentes. Contudo, a resposta em frequência de cada subportadora é projetada de modo que seja zero no centro das subportadoras adjacentes. As subportadoras podem, portanto, ser amostradas em suas frequências centrais sem interferências de seus vizinhos.

Assim, um caminho óptico elástico pode transmitir múltiplas taxas de dados, pois seu tamanho é alocado de acordo com a demanda requisitada pelo cliente. Os elementos principais da arquitetura da rede EON são:

- Transmissores de largura de banda variável (*Bandwidth-Variable Transponder*- BVT)

Os BVTs são responsáveis por alocar espectro suficiente para atender cada pedido de conexão. Em EON, várias subportadoras OFDM podem ser combinadas para formar um supercanal transportando os dados sem bandas de guarda no espectro. Dessa forma, os BVTs criam caminhos ópticos com largura de banda flexível permitindo, o ajuste dos recursos ópticos de acordo com a demanda necessária [26].

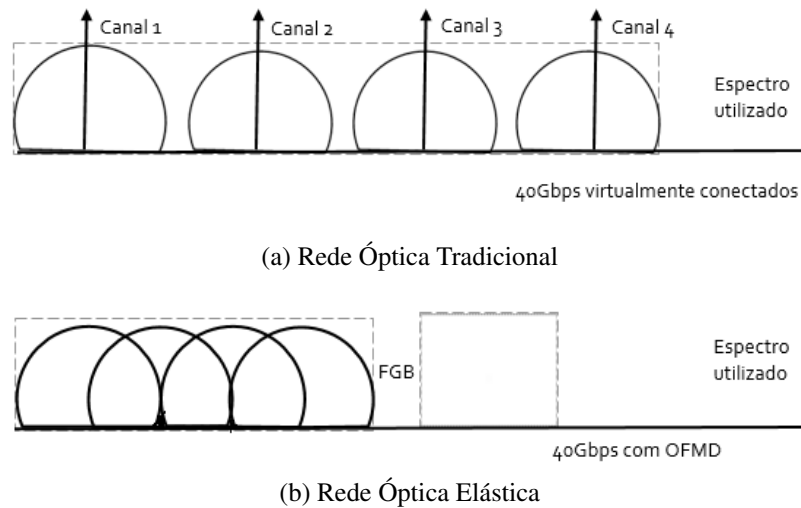


Figura 3 – Comparação entre os caminhos ópticos com grade fixa e flexível.

- Comutadores ópticos de banda variável (*Bandwidth-Variable Wavelength Cross-Connects* - BV-WXC) que permitem o estabelecimento de caminhos ópticos com grade flexível. Os BV-WXC são os elementos responsáveis por estabelecer um caminho óptico fim-a-fim com a largura de banda necessária para acomodar os recursos espectrais estabelecidos pelos BVTs. Quando os BVTs aumentam a taxa do tráfego, cada BV-WXC na rota deve expandir sua janela de comutação, permitindo assim uma taxa de dados variável em cada caminho óptico [26].

Um dos principais desafios em um EON é como determinar os recursos espectrais mínimos necessários e alocá-los adaptativamente a um canal óptico com banda de guarda mínima entre canais. O espectro mínimo necessário é determinado pelas condições ao longo do percurso óptico que resultam na relação sinal/ruído (*Signal Noise-to-Ratio* - SNR) entregue, e distorções lineares e não lineares, garantindo, simultaneamente, a taxa de dados e o alcance óptico necessário. Esse problema é intensificado em um ambiente dinâmico, onde a conexão deve expandir / contrair sem afetar o tráfego [8].

Para determinar a rota, a gama de espectro e o formato de modulação para um canal óptico, é necessário definir algumas terminologias. A faixa de frequência que um canal óptico pode ocupar é definida como uma janela de frequência (*Frequency Slot* - FS). A largura total do FS pode ser ajustada de forma flexível. Desde o ponto de vista prático para simplificar o desenho de rede, é útil quantificar os recursos de espectro de fibra utilizáveis em unidades de frequência contíguas com uma largura apropriada de, por exemplo, 12,5 GHz. Este é um bloco de construção para o FS, que é chamado de unidade de faixas de frequência (*Frequency Slot Unit* - FSU).

2.2 O Problema de roteamento e alocação de espectro

O problema de roteamento e alocação de espectro (*routing spectrum allocation* - RSA) na rede óptica elástica é análogo ao problema de roteamento por alocação de comprimento de onda (*Routing Wavelength Assignment* - RWA) em redes baseadas em WDM. A diferença entre RSA e RWA é a capacidade de alocar com flexibilidade o espectro de frequências [27]. No RSA, um conjunto de *slot* de frequência (FSs) contíguos é atribuído a uma conexão em vez de um comprimento de onda RWA. Se não houver FSs suficientes para a conexão necessária, considera-se que haverá um bloqueio. Uma maneira de evitar esse problema, é dividir a demanda em outras menores que pode ser atribuída dentro do espectro para diferentes rotas. A Fig.4 mostra de forma simples um exemplo de RSA quando cinco enlaces são adotados. O problema de RSA pode ser dividido em dois tipos: estático e dinâmico [28]. No caso estático os pedidos de conexão são conhecidos antecipadamente, no entanto, no caso dinâmico os pedidos de conexão chegam em tempo real. Existem três restrições importantes na camada física quando se trata do problema RSA [29]:

1. **A contiguidade do espectro ou adjacência:** esta restrição define que cada FS deve ser adjacente um ao outro em um mesmo canal ou caminho óptico elástico. Esta restrição é definida pelas características físicas da rede óptica elástica.
2. **Continuidade do espectro:** define os recursos espectrais atribuídos deve ser o mesmo em toda a rota correspondente a um caminho óptico, uma vez que não há capacidade de conversão de comprimento de onda.
3. **Restrição de conflito espectral:** define que o espectro atribuído a uma demanda de tráfego não deve interferir ou se sobrepor a outra demanda de tráfego.

A abordagem do problema RSA é baseada em uma dada demanda, composta por um par de nó origem-destino e uma quantidade de slot de frequência, e deve ser encontrada uma rota que tenha disponível pelo menos a quantidade de slot de frequência solicitada [27–29].

2.2.1 Os tipos de RSA e suas variantes:

O problema RSA pode ser tratado em dois sub-problemas que são: o problema de roteamento e o problema da alocação de espectro [29].

2.2.1.1 O problema de Roteamento

O problema de roteamento pode novamente ser dividido em dois sub-problemas; encaminhamento sem características elásticas e encaminhamento com características elásticas [29].

Enlace 1	█	█	□	█	□	█	█	█	█	█
Enlace 2	█	█	█	█	█	□	□	█	□	█
Enlace 3	█	█	█	□	□	□	□	█	█	█
Enlace 4	█	█	█	█	█	□	□	█	█	█
Enlace 5	█	█	□	█	█	█	█	□	█	□
Slots	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

a-) Conexão Recursada

Enlace 1	█	█	□	█	□	█	█	█	█	█
Enlace 2	█	█	█	█	█	█	█	█	□	█
Enlace 3	█	█	█	□	█	█	█	□	█	█
Enlace 4	█	█	█	█	█	█	█	□	█	█
Enlace 5	█	█	□	█	█	█	█	□	█	□
Slots	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

b-) Conexão Estabelecida

█ Slots Usados □ Slots Disponível █ FS disponível para a demanda

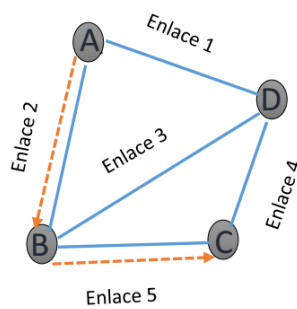


Figura 4 – Exemplo simples de RSA.

1. Roteamento sem características elásticas

Aqui serão discutidos os diferentes algoritmos de roteamento que não consideram as características elásticas das redes ópticas. Esses algoritmos são: Roteamento Fixo (*Fixed Routing*), Roteamento Alternativo Fixo (*Fixed Alternative Routing*), Roteamento Menos Congestionado (*Least Congested Routing*) e Roteamento Adaptativo (*Adaptive Routing*) [30–33].

- a) **Roteamento Fixo (*Fixed Routing - FR*):** neste tipo de algoritmos uma única rota é calculada usando um algoritmo de menor caminho. Se para esta rota não dispõe-se FS suficiente para cobrir a demanda, o pedido é bloqueado. No caso em que dispõe-se mais FS livre do que solicitado, um algoritmo de alocação de espectro é usado [30].
- b) **Roteamento Alternativo Fixo (*Fixed Alternative Routing - FAC*):** é uma melhoria do algoritmo FR mantendo em cada nó da rede uma tabela de roteamento que contém uma lista ordenada de rotas fixas para todos os outros nós. Para cada pedido de conexão, a origem procura sequencialmente por uma possível rota na sua tabela de roteamento. Se nenhuma rota atende as características da demanda, o pedido

está bloqueado. No caso em que tem mais FS do que o solicitado, um algoritmo de alocação de espectro é usado [31].

- c) **Roteamento Menos Congestionado (*Least Congested Routing*):** é muito semelhante ao FAR, em cada nó tem-se ordem sequencial das possíveis rotas para os outros nós, e dependendo da chegada das conexões no tempo, rotas menos congestionadas são atribuídas. Uma rota menos congestionada é aquela que possui mais FS livre. Analogamente aos casos anteriores, se nenhuma rota atende as características da demanda, o pedido está bloqueado. No caso em que tem mais FS do que o solicitado, um algoritmo de alocação de espectro é usado [32].
- d) **Roteamento Adaptativo (*Adaptive Routing - AR*):** no roteamento adaptativo a rota é escolhida dinamicamente dependendo da informação do estado *link-route* da rede entre todas as rotas possíveis para o par origem-destino. Esta informação é obtida através do conjunto de conexões estabelecido na rede. O roteamento adaptativo atinge uma baixa probabilidade de bloqueio, no entanto, a complexidade e o tempo de execução aumentam em comparação com os algoritmos anteriores [33].

2. Roteamento com características elásticas

Em uma rede óptica elástica, um único caminho roteado via um RSA pode causar a fragmentação do espectro, esse problema aumenta o número de bloqueios na rede, uma vez que diminui a quantidade de *slot* de frequência contígua disponível. Para superar este problema de roteamento, o roteamento *multi-path* foi proposto para redes ópticas elásticas. O roteamento *multi-path* considera todas as rotas possíveis entre os nós e gera um conjunto de caminhos possíveis entre um par de origem-destino. Cada requisição de conexão é dividida em demandas menores e roteadas em paralelo através dos possíveis caminhos para o par origem-destino, podendo controlar a fragmentação do espectro da rede em geral [34].

2.2.1.2 O problema da alocação de espectro

O modo de alocação do espectro para uma demanda pode ser alterada de acordo com os pedidos de conexão com o intuito de usar o espectro de forma mais eficiente. Os algoritmos de alocação de espectro têm duas variantes. Um focado na atribuição de uma faixa do espectro para um grupo de conexões chamado em inglês *Spectrum Range Allocation for Connection Groups* e o outro focado na atribuição do espectro para pedidos de conexão individual chamado de *Spectrum Slot Allocation for Individual Connection Request* [35, 36].

1. Atribuição de uma faixa de espectro para um grupo de conexões: Para atribuir o espectro a um grupo de solicitações, a frequência central (*Central Frequency - CF*) está na banda C (1530 - 1565 nm) do espectro onde cada uma delas deve estar em $(193,1 + (n \times 0,0125))$ THz, sendo n um inteiro) e a largura do *slot* (a largura do *slot* é igual a $(12,5 \text{ GHz} \times m)$,

onde m é um inteiro positivo) devem ser consideradas para as atribuições ao grupo de solicitações. Existem três maneiras de fazer as atribuições: (a.1) Espectro de alocação fixa (*Fixed Spectrum Allocation* F-SA), (a.2) Espectro de alocação semi-elástico (*Semi-Elastic Spectrum Allocation* - SESA) e (a.3) alocação elástico do espectro (*Elastic Spectrum Allocation* - ESA) [35, 36].

- a) **Alocação de espectro fixo (*Fixed Spectrum Allocation* - FSA):** este é o caso básico, uma frequência central e sua correspondente largura de banda do *slot* fixas são atribuídas para cada canal ao longo do tempo em que as demandas permanecem. Como mostrado na Fig.5, o espectro atribuído em um tempo T , é mantido para o tempo T' . Neste tempo parte ou totalidade do espectro atribuído pode ser usado, porém nunca compartilhará o espectro com outros canais ou outras demandas [36].
- b) **Atribuição de espectro semi-elástico (*Semi-Elastic Spectrum Allocation* - SESA):** a frequência central (*Central Frequency* - CF) CF é fixo, mas a largura de banda do *slot* pode variar em cada período de tempo. Somente os FSs que estão na borda dos canais atribuídos a cada demanda podem ser compartilhados entre os canais adjacentes. Na Fig.6(a) e Fig.6(b), tem-se um exemplo de como o espectro pode ser reduzido ou expandido em momentos diferentes respectivamente [35].
- c) **Alocação elástica do espectro (*Elastic Spectrum Assignment* - ESA):** Tanto o CF quanto a largura do *slot* podem variar e ser compartilhados entre os canais adjacentes. Os FSs compartilhados serão atribuídos apenas a cada canal em momentos diferentes. A atribuição elástica tem duas variantes: ESA com Expansão / Redução de Espectro e ESA com Re-Alocação de Espectro [35, 36].
 - i. **Expansão / Redução do Espectro:** para este caso, o espectro compartilhado entre os canais adjacentes será no máximo a largura do menor canal. O movimento do CF é limitado ao intervalo de frequência do pedido mais amplo. Na Fig7(a) é mostrado para os tempos T e T' a largura do espectro alocado pode variar, mas o CF varia somente no intervalo especificado.
 - ii. **Re-Alocação de Espectro:** não há restrições para este caso, qualquer parte do espectro pode ser reatribuída em outro espaço. Os movimentos do CF não são limitados. A Fig.7(b) mostra como 2 canais foram atribuídos variando completamente a posição CF e a largura de espectro atribuída.

2. Alocação de espectro para solicitações de conexão individuais [37–39]:

- a) **First-Fit:** é a forma mais simples de atribuir o espectro para um pedido de conexão. O pedido recebido é colocado nos primeiros *slots* de frequência contíguos disponível.
- b) **Random Fit - RF:** o algoritmo RF mantém uma lista de blocos de *slot* de frequência disponíveis, quando uma solicitação de conexão chega, o algoritmo seleciona aleatoriamente um dos blocos disponíveis que atenda a demanda.

- c) **Last Fit:** é muito semelhante ao *first fit* com a diferença que sempre seleciona blocos FS livres dos maiores índices na lista de blocos de FS disponível e que atenda ao pedido de conexão.
- d) **First-Last Fit:** este algoritmo divide todos os FS disponível em várias partições para mais tarde selecionar os slots com o menor índice das partições ímpar da lista de FS disponível. Para as partições pares, procura-se selecionar aqueles com maior índice. Uma vez selecionado um bloco de FS, pode-se usar o *first fit* ou *random fit* para atribuir o espectro ao pedido de conexão.
- e) **Least Fit:** Atribui o espectro de uma lista FS disponíveis que foram menos utilizados nos enlaces da rede. Se há muitos espectros que compartilham a mesma utilização, *first fit* é usado para atribuir o espectro.
- f) **Most Used:** Atribui o espectro de uma lista de FS disponíveis que têm sido mais utilizados nos enlaces da rede. Além disso, como *least used*, é utilizado o *first fit* para atribuição de espectro à demanda, caso haja muitos FS que têm o mesmo uso.
- g) **Exact Fit:** Baseia-se na busca da lista do FS disponível, um bloco de FS que corresponde exatamente a quantidade de FS solicitada. Se não houver nenhum bloco que tenha exatamente a quantidade necessária, um *First Fit* é usado para atender a demanda. Com este algoritmo podemos reduzir a fragmentação do espectro dentro da rede.

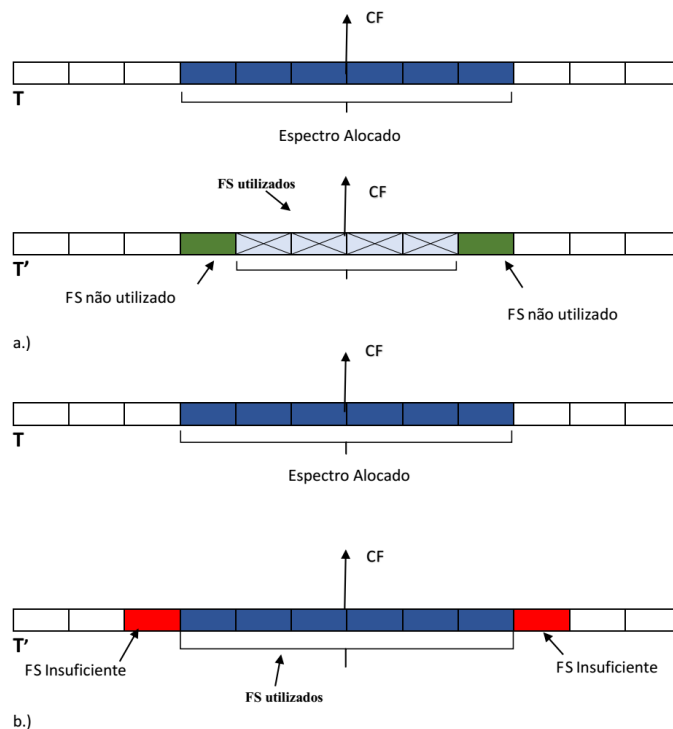


Figura 5 – Alocação fixa de espectro.

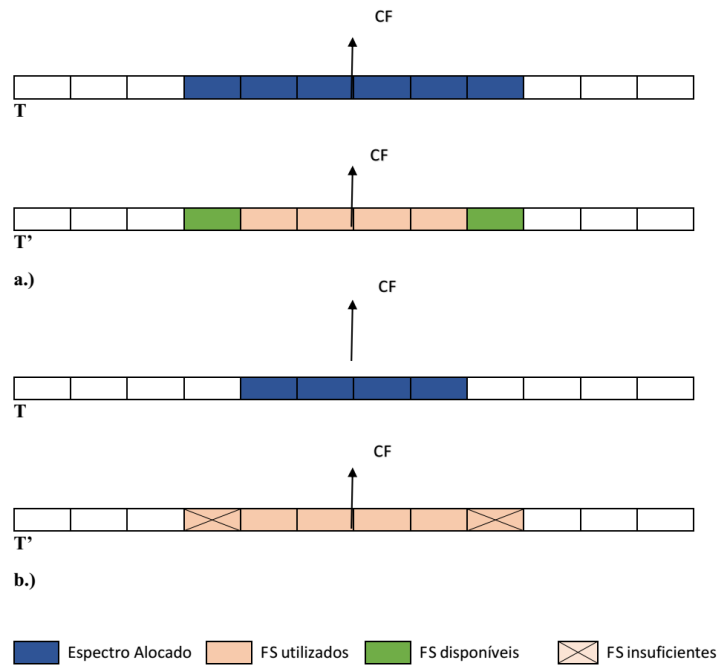


Figura 6 – Alocação semi-elástico do espectro.

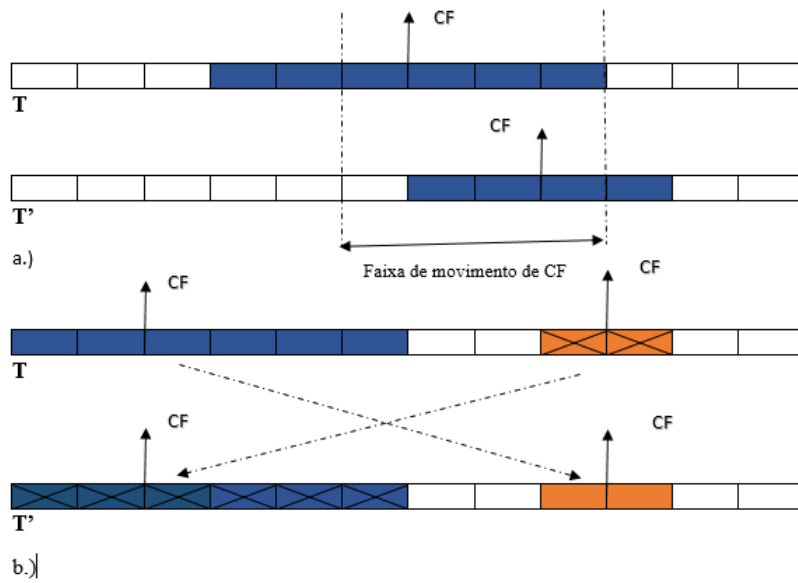


Figura 7 – Alocação elástica do espectro com expansão e redução.

2.3 Comunicação Digital

2.3.1 Modulação Adaptativa

As modulações mais usadas nas redes de telecomunicações, com ou sem modulação adaptativa, são as do tipo M-PSK (*Multiple Phase-Shift Keyed*) e M-QAM (*Multiple Quadrature Amplitude Modulation*) [24, 25, 40–48]. As modulações podem ser binárias, onde apenas dois símbolos são gerados no processo de modulação, cada um transportando um *bit*, ou *M*-árias, onde *M* símbolos podem ser gerados, cada um contendo $\log_2 M$. Nas Fig.8.a, Fig.8.b e Fig.8.c apresentam-se os esquemas de constelação das modulações BPSK, QPSK, e 16QAM respectivamente.

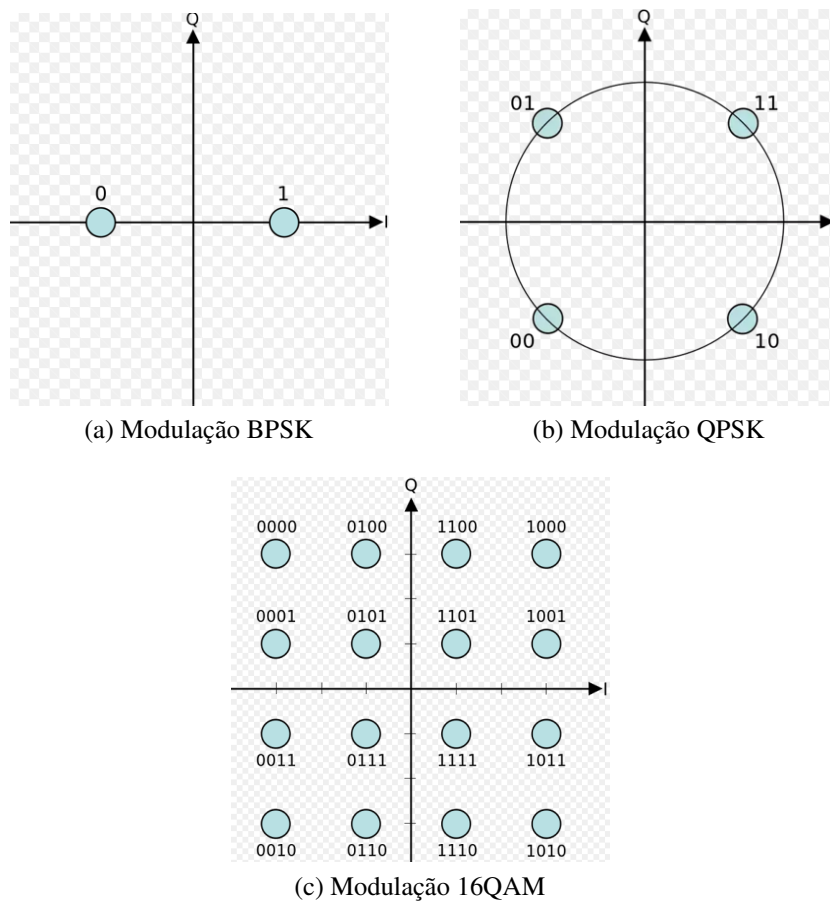


Figura 8 – Esquema de constelação das modulações BPSK, QPSK e 16QAM.

A probabilidade de erro de símbolo (ou probabilidade de erro de *bit*) em função da relação sinal-ruído e a eficiência de largura de faixa, definida como o número de *bits* que podem ser transmitidos para cada 1 Hz de largura de faixa disponível no canal, são dois parâmetros importantes na análise de desempenho de modulações digitais [42]. Para as modulações M-PSK e M-QAM, a eficiência de largura de faixa e a probabilidade de erro de símbolo aumentam com o valor de *M*. Considerando-se a filtragem de *Nyquist*, a eficiência de largura de faixa para as

modulações M-PSK e M-QAM é dada por [49] :

$$\varepsilon_{mod} = \log_2 M \quad (2.1)$$

ε_{mod} é definida em (bps/Hz). Na modulação BPSK (*Binary PSK*), a probabilidade de erro de símbolo e a probabilidade de erro de *bit* assumem o mesmo valor conforme (2.2). Considerando que o canal apresenta ruído branco aditivo e gaussiano (*Additive White Gaussian Noise* - AWGN) e o uso de detecção coerente, a probabilidade de erro de *bit* para esta modulação é dada por[49]:

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

sendo $Q(x)$ a função erro complementar e E_b/N_o é a relação entre a energia de *bit* e a densidade espectral de ruído, que se relaciona com a relação sinal-ruído da forma expressa pela (2.4), na qual Bw é a largura de faixa do canal e R é a taxa de transmissão em bps. u é uma variável aleatória [49].

$$Q(x) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du\right) \quad (2.3)$$

$$\frac{E_b}{N_o} = SNR \frac{Bw}{R} \quad (2.4)$$

No caso das modulações M-PSK ($M > 2$), para um canal AWGN e detecção coerente, a probabilidade de erro de símbolo é dada por [49]:

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

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

Para modulações M-QAM, a probabilidade de erro de *bit* depende da constelação utilizada. Para constelações retangulares, mais comuns, admitindo-se canal AWGN e recepção com filtro casado, a probabilidade de erro de *bit* pode ser calculada por [49]:

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

Em Eq.2.6, L é o número de níveis de amplitude em uma dimensão ($M = L^2$) para constelações quadradas. Para modulações M-árias, a relação entre a probabilidade de erro de símbolo e a probabilidade de erro de *bit*, admitindo que os símbolos vizinhos na constelação difiram em

apenas um *bit*, o que significa que a alocação *bit*-para-símbolo segue um código *Gray*, pode se aproximada, para $P_e \ll 1$

$$P_b = \frac{P_e}{\log_2 M} \quad (2.7)$$

Em Eq.2.7, P_e é a probabilidade de erro de símbolo da modulação considerada e P_b é a probabilidade de erro de *bit* correspondente.

2.3.2 Código de Correção de Erro

O ruído, as imperfeições do canal e eventuais interferências podem provocar erro na recepção do sinal em sistemas de telecomunicações [50–54]. A possível ocorrência de erro não é admissível para a maior parte das aplicações (uma certa taxa é tolerada em algumas aplicações), sendo necessário utilizar mecanismos para detectar e corrigir os eventuais erros. Basicamente, existem dois métodos para se lidar com erros: a correção automática do erro no receptor, denominado códigos de correção automática (*Forward Error Correction* - FEC), e a detecção do erro e sua correção por retransmissão, denominado protocolo de retransmissão automático por demanda (*Automatic Repeat reQuest* - ARQ), podendo também utilizar-se de alguma técnica híbrida que envolva FEC e ARQ [46, 50–56].

As análises neste trabalho consideram o uso de FEC para correção do erro. A escolha do mecanismo FEC é devido a seu melhor desempenho sobre o ARQ nas análises de desempenho das técnicas de controle de erro adaptativo [57]. Os códigos de correção automática de erro podem ser divididos, em duas famílias: códigos de blocos e convolucionais. Sem perda de generalidade, considera-se que a correção de erro é implementada por meio de códigos de bloco.

Em um código de bloco (n, k) , a mensagem a ser transmitida é denominada vetor mensagem, composta de k *bits* de informação, são acrescentados $n-k$ *bits* de redundância (também denominados de *bits* de paridade), formando um bloco de n *bits*, denominado vetor código ou palavra código. A capacidade de correção automática de erro do código depende da taxa do código, que é definida como a relação entre o número de *bits* de informação, k , dividido pelo número total de *bits*, n . Considera-se que o canal óptico é não estacionário e as taxas de erro de *bit* variam com o tempo. Nos sistemas que não utilizam codificação adaptativa, os códigos são estacionários devem ser implementados para garantir determinado desempenho para o pior caso das características do canal. Logo, utiliza-se *bits* de redundância desnecessários para a situação em que o canal está em boas condições de propagação.

2.3.3 Capacidade de Correção de Erros dos Códigos de Blocos

A capacidade de correção de erro de um código de blocos é definida por um parâmetro do código denominado de distância mínima entre vetores códigos. A distância de *Hamming* entre dois vetores é o número de posições em que estes vetores diferem. Ou seja, mede o

quanto estes vetores são parecidos, distância de *Hamming* pequena, ou diferentes, distância de *Hamming* grande [54]. A distância mínima de um código é a menor distância de *Hamming* obtida comparando-se cada vetor código com todos os outros vetores códigos, ou seja, é a distância de *Hamming* entre os dois vetores códigos mais parecidos do código.

A capacidade de correção de erro do código é calculada a partir da distância mínima como [54]:

$$t = \left\lfloor \frac{d_{min} - 1}{2} \right\rfloor \quad (2.8)$$

em que t é o número máximo de *bits* errados que podem ser corrigidos em um bloco, d_{min} é a distância mínima do código e a notação $\lfloor x \rfloor$ significa o maior inteiro menor ou igual a X .

2.3.4 Códigos BCH (Bose, Chaudhuri e Hocquenghem)

Os códigos *Bose-Chaudhuri-Hocquenghem* (BCH) fornecem excelente desempenho, alavancando algoritmos de codificação e decodificação de códigos algebraicos compatíveis com os equipamentos. Em contraste com os códigos de verificação de paridade de baixa densidade (*Low-Density-Parity-Check* - LDPC), para os quais o código de componente de verificação de paridade simples prevê apenas detecção de erro, os códigos BCH fornecem correção de erro.

Assim, o número de *bits* de paridade necessários para uma dada capacidade de correção automática de erro pode ser determinado por meio dos resultados obtidos para uma família de códigos em especial. Nesta seção, apresentam-se alguns resultados para os códigos BCH, posteriormente utilizados nas análises. Para quaisquer inteiros positivos m ($m > 2$) e t ($t < 2^m - 1$), existe um código BCH binário com os seguintes parâmetros [54]: $f(t)$ (2.9) é o comprimento total do código, k é número de *bit* de informação. O aumento de t (capacidade de correção de erro do código FEC) significa que mais erros podem ser corrigidos no receptor. No entanto, o consumo de energia aumentará.

$$f(t) = \begin{cases} l = 2^m - 1 \\ m - k \leq m \times t \\ d_{min} \geq 2t + 1 \end{cases} \quad (2.9)$$

2.3.5 Código FEC em comunicação óptica

Os códigos de baixa densidade de verificação de paridade (*Low Density Parity Check* - LDPC) têm atraído muita atenção ao longo da última década [53]. Os códigos LDPC proporcionam um aumento no desempenho do sistema em relação aos sistemas de correção de erros (FEC) utilizados em sistemas de comunicação óptica [50]. Um esforço significativo foi feito para aplicar as técnicas de codificação FEC aos sistemas de transmissão óptica a partir da proposta de

Grover para sistemas de ondas de luz com dispersão limitada por laser [58]. Particularmente, em sistemas submarinos transoceânicos, os códigos de correção de erros, como o código Bose Chiandhuri Hocquenghem ou o código Reed Solomon, foram selecionados para implementação prática [51].

Os pesquisadores Sab e Lemaire propuseram a utilização de códigos turbos para o sistema de transmissão submarina de longa distância da *Alcatel* [52]. A velocidade de transmissão, o desempenho de erro e a complexidade do equipamento do descodificador podem ser ainda melhorados usando códigos de controle de erros poderosos, em particular códigos de verificação de paridade de baixa densidade (LDPC).

2.3.5.1 Evolução dos Códigos FEC

Os sistemas ópticos de comunicação passaram a incluir gradualmente a codificação de canal em suas tecnologias de transmissão, com o intuito de conseguir taxas de erro de *bit* pós-FEC entre 10^{-12} e 10^{-15} . As gerações de FEC para sistemas ópticos evoluíram da seguinte forma: a primeira geração surgiu na década de 1990, e aplicava códigos Reed-Solomon, com decisão abrupta e redundância de aproximadamente 7% [59, 60]. A taxa de erro de *bit* pré-FEC requerida nessa geração era em torno de 6×10^{-5} ; a segunda geração, a partir de 2000, evoluiu para a codificação/decodificação de canal feita por dois códigos em cascata, dando origem às combinações de códigos concatenados, ainda de decisão abrupta. Utilizavam-se combinações entre códigos Reed-Solomon, BCH ou Hamming. Nessa geração, a BER pré-FEC estava em torno de 3 a 8×10^{-3} . Por fim, a terceira geração caracteriza-se pela utilização de códigos iterativos e de decisão suave, como os códigos Turbo e o LDPC [60]. Essa última geração é marcada pela utilização de maiores porcentagens de redundância (tipicamente até 25%) e pelo aumento da BER pré-FEC requerida para taxas da ordem de 10^{-2} .

Com a evolução das comunicações ópticas ao longo dessas três gerações, verificaram-se aumentos significativos nos desempenhos dos esquemas de codificação e na complexidade computacional dos codificadores/decodificadores propostos para sistemas ópticos. A Tabela 1 mostra um resumo das características das gerações de códigos corretores de erro, em que os desempenhos estão mensurados em termos dos valores típicos de ganho líquido de codificação (*Net Coding Gain* - NCG) para cada geração de FEC.

Tabela 1 – Informações sobre as três gerações de código FEC.

Geração	Tipos de Códigos	Limite de OSNR(dB)	Overhead(%)	Ganho de Codificação(dB)
1 ^a	RS	14,5	6,69	5,8
3 ^a	RS, BCH	12,6	13,34	7,3
3 ^a	Turbo, LDPC	9,1	21,20	11,27

2.4 Conclusão

Neste capítulo, foram abordados os conceitos teóricos utilizados em comunicação de rede de fibra óptica. Os estudos apontam que a tecnologia WDM apresenta diversas ineficiências, uma vez que ela não resolve as limitações da camada física da rede. Os parâmetros de modulação, codificação arquitetura da rede etc são fixos nas tecnologias WDM. Como consequências, os requisitos da qualidade de transmissão, qualidade de serviço não são atendidos e a redução dos gastos energéticos continuam sendo um grande desafio.

No próximo Capítulo será apresentado detalhadamente o modelo de consumo de energia e eficiência energético em redes ópticas elásticas. Serão introduzidos os critérios de escolha de modulação e codificação de forma dinâmica visando a melhoria da eficiência de energia da rede óptica.

CAPÍTULO 3

3 Modelo de Consumo de Energia e Eficiência Energética

3.1 O-OFDM em Rede Óptica Elástica

Nesta seção, serão descritos os conceitos de consumo de energia e eficiência energética em redes de fibra óptica. Considera-se um diagrama genérico de blocos de um sistema OFDM ilustrado na Fig.9. O diagrama de blocos representa o conjunto de componentes, tais como: transmissor, enlaces de fibra óptica com amplificadores ópticos, comutadores *Bandwidth-Variable Optical Cross-Connects* (BV-OXCs) e receptor. Este diagrama de bloco não é estacionário, ao contrário, ele pode ser modificado de acordo com as especificações dos sistemas, taxa de *bits*, taxa de código e distância entre os nós [61].

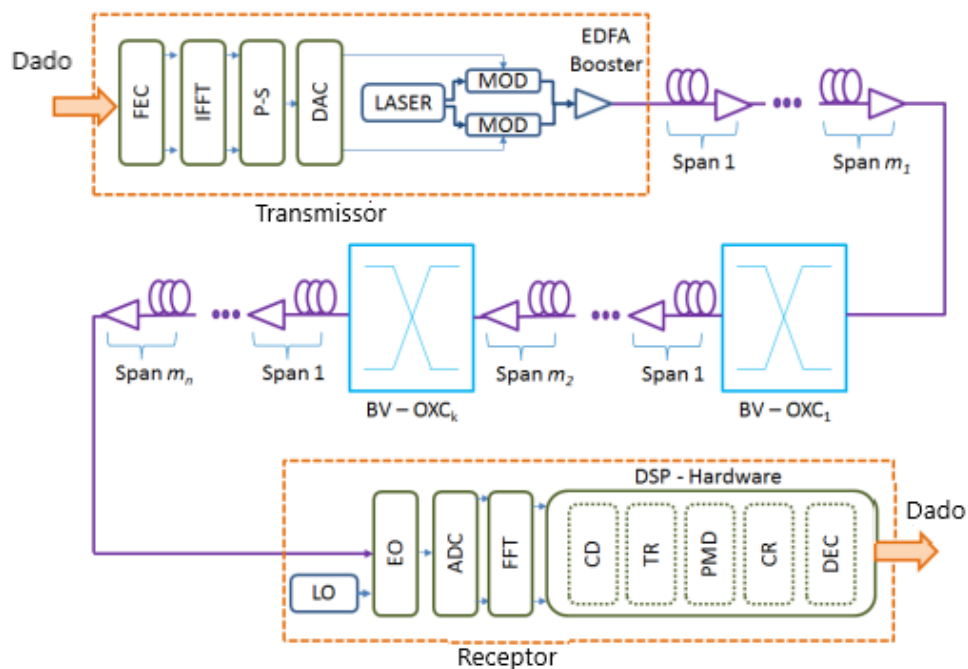


Figura 9 – Diagrama de bloco do sistema de transmissão baseado em OFDM para caminho óptico fim a fim.

No transmissor OFDM, para cada pedido de conexão, o fluxo de dados de alta taxa de *bit* é codificado na entrada com um tipo de código FEC, podendo ser RS, RS/BCH ou LDPC. Como é abordado o conceito de codificação adaptativa, cada um destes códigos será selecionado de acordo ao valor da OSNR do caminho óptico. O módulo Serie/Paralelo (S/P) tem a função de converter em baixa taxa de *bits* os dados codificados com alta taxa de *bit*. Considerando a possibilidade de transmissão além de 100 Gbps, poderia ser utilizado um modulador de pulso

digital opcional para redução da ocupação da largura de banda.

Os *bits* são mapeados usando algum formato de modulação, como BPSK, QPSK, 8-PSK e M-QAM ($M = 16, 32, 64$), em símbolos complexos. Estes símbolos modulam o conjunto de subportadoras ortogonais e os símbolos OFDM do domínio do tempo são obtidos pela transformação rápida inversa de Fourier (*inverse fast Fourier transformation* - IFFT). Depois disso, um prefixo cíclico (*cyclic prefix* - CP) é adicionado a cada símbolo OFDM copiando o final (ou início) do bloco gerado pelo IFFT para o início (ou final) do bloco visando reduzir as interferências inter-simbólicas (*Inter-symbol interference* - ISI) entre símbolos transmitidos. Assim, no passo seguinte, conforme ilustrado na Fig.9, os símbolos paralelos discretos no transmissor passam por conversão paralelo para série (P/S) e de conversão digital para analógico (*Digital and Analogic Conversor* - DAC) para gerar um sinal de domínio de tempo contínuo [61].

No transmissor óptico, os sinais OFDM elétricos são modulados por meio de um modulador *Mach-Zehnder* (MZM). Depois que a transmissão do sinal foi amplificada pelos amplificadores a fibra dopada com Érbio (*Erbium Doped Fibre Amplifier* - EDFA), o consumo de energia no enlace de transmissão, devido aos amplificadores ópticos utilizados em cada intervalo para compensar a atenuação da fibra aumenta proporcionalmente ao número de EDFAs utilizados no enlace óptico. Além disso, considera-se que a alocação de potência dos amplificadores ópticos na entrada / saída BV-OXC da fibra visa compensar as perdas de inserção dos BV-OXCs. Note-se que nos BV-OXCs instalados através do caminho óptico, o consumo de energia é dividido entre os BV-WSSs e a unidade de controle. Em um receptor típico coerente, o sinal de entrada é recebido no conjunto eletro-óptico (*Electro-Optical* - EO) constituído por um fotodetector (*Photodetector*-PD), um amplificador de transimpedância com controle automático de ganho (*Trans-Impedance Amplifier with Automatic Gain Control* - TIA / AGC) e um oscilador local (*Local Oscillator* - LO) [61].

Na Fig.9, o bloco EO representa o conjunto de PD e TIA / AGC, e este bloco está ligado ao LO. Por sua vez, o ADC converte o sinal serial analógico em blocos de dados paralelos para recuperar dados das subportadoras ortogonais. A saída ADC consiste em fluxos paralelos de dados a uma taxa de relógio adequada para processamento CMOS. Depois disso, o CP é removido e o sinal OFDM é convertido de volta para o domínio de frequência usando FFT. O tratamento do sinal é realizado no bloco DSP onde os processos de compensação de dispersão (CD), recuperação de tempo (TR), compensação PMD, recuperação de portadora (CR) e decodificação são realizados antes da conversão de dados para os dados em série de saída.

3.2 Escolha de Modulação e Código FEC

Em redes ópticas elásticas, a qualidade de transmissão (*Quality of Transmission* - QoT) do sinal é severamente afetada por várias limitações da camada física que não podem ser ignoradas.

Entre estas limitações, pode-se citar: emissão espontânea amplificada (*Amplified Spontaneous Emission*-ASE), dispersão de modo de polarização (*Polarization Mode Dispersion* - PMD), dispersão cromática (*Chromatic Dispersion* - CD), *Crosstalk* (XT), automodulação de fase (*Self-Phase Modulation* - SPM), modulação cruzada de fase (*Cross-Phase Modulation* - XPM) e mistura de quatro ondas (*Four-Wave Mixing* - FWM).

O projeto tradicional da rede óptica baseia-se na abordagem do pior caso com uma taxa de erro de *bit* fixo. Como resultado, qualquer caminho óptico diferente da margem estabelecida compromete a QoT e QoS e é descartado. A O-OFDM permite a introdução de taxa de *bits* adaptável à distância e a alocação de espectro para economia de recursos espectrais. Portanto, foi utilizada a fórmula empírica introduzida por Klekamp *et al.* para sistemas coerentes [14]. Este modelo inclui a perda na fibra, limites de OSNR, XPM, FWM, bem como uma margem adicional OSNR de 3 dB largura de banda de comprimento de onda variável conecta ao longo dos caminhos [14].

$$D_{imax} = \frac{1}{2} [-804.3 \times \ln(B_R) + 5584,6] \quad (3.1)$$

em (3.1), B_R denota a taxa de transmissão (*Gbps*) e D_{imax} simboliza a distância máxima em quilômetro (*km*) alcançada por cada modulação.

Matematicamente, a largura de banda requerida para atender um determinado pedido de conexão pode ser calculada usando a Equação empírica de Klekamp *et al.* A equação (3.1) pode ser reformulada da seguinte forma:

$$\frac{2792,3 - D_{imax}}{402,15} = \ln(Bw_i \times \log_2 M) \quad (3.2)$$

Suponha-se que a parte esquerda da Equação 3.2 acima seja A_i . Assim:

$$A_i = \frac{2792,3 - D_{imax}}{402,15}$$

Para cumprir os requisitos da qualidade de transmissão e tomar em conta as imperfeições dos efeitos lineares e não lineares, $A_i \geq 1$. Em outras palavras $\frac{D_{imax}}{\Psi} \leq \delta$ que é um limitante superior. A constante $\delta \approx 7$ é nada mais que $\frac{2792,3}{402,15}$ arredondado ao inteiro superior enquanto $\Psi = 402,15$.

Conhecendo o comprimento de um pedido de conexão em termo de distância, a largura de banda requerida pode ser calculada da seguinte forma:

$$Bw_i = \frac{e^{(A_i)}}{\log_2 M} \quad (3.3)$$

Conforme ilustrado na Fig.10, o alcance óptico diminuí com o aumento na taxa de *bits*. Assim a distância de transmissão é mais susceptível às limitações físicas à medida que a

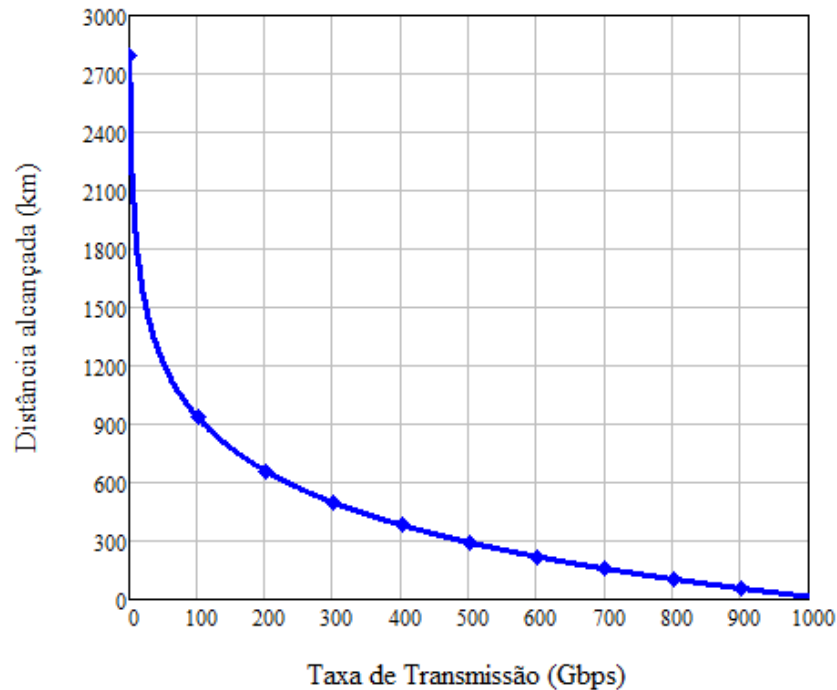


Figura 10 – Alcance de transmissão versus taxa de *bits*.

taxa de *bits* aumenta. A relação entre a taxa de modulação e a distância de transmissão para as modulações BPSK, 8PSK e 64QAM é mostrada na Fig.11. Por um lado, percebe-se que a medida que aumenta o número de símbolos por *bit* no esquema de constelação a distância de transmissão diminui. Quando os pedidos de conexão chegam na rede óptica, as modulações com baixo símbolos no esquema de constelação (BPSK e QPSK) são empregadas para grandes distâncias. Um problema chave é que quanto maior o nível de formato de modulação, mais suscetível às limitações físicas. Por outro lado, pode-se identificar a largura de banda requerida para atender uma demanda de conexão. Por exemplo, se a distância entre os nós de origem e destino for 800 km, a largura de banda requerida é $Bw_i = 46$ GHz correspondendo à modulação 8-PSK. As modulações QPSK e BPSK poderão ser usadas para atender o mesmo pedido de acordo à distância.

Para a seleção de modulação, BPSK é a forma mais simples de PSK e é empregada para maiores distância de transmissão uma vez que possui menor taxa de erro de *bit* em comparação com as outras modulações. A modulação QPSK é amplamente aplicada em sistemas de comunicação de hoje por sua eficiência de alto espectro e poderosa capacidade anti-interferência. Além disso, as modulações 16-QAM, 32-QAM e 64-QAM são frequentemente usadas em sistemas de transmissão de alta taxa de *bits*. Neste trabalho, os formatos de modulação BPSK, QPSK, 8-PSK, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM são utilizados.

O número *slots* de frequência (N_{si}) que cada caminho óptico requer, considerando a largura de banda requerida, o formato de modulação e a largura de bando do *slots*, pode ser

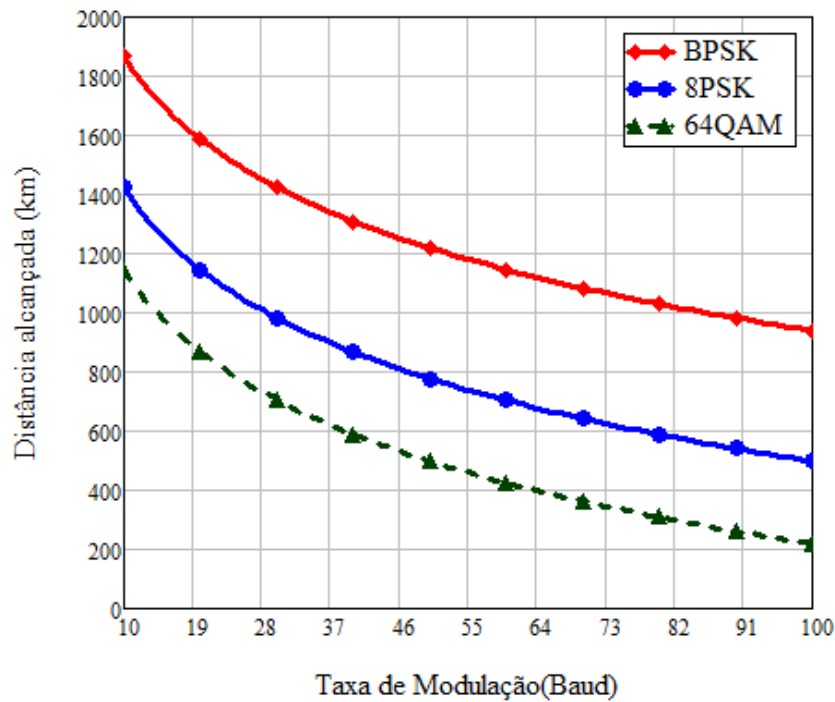


Figura 11 – Máxima distância de transmissão versus taxa de modulação.

calculado por meio da Equação (3.4) [61]:

$$N_{si} = \left\lceil \frac{B_{wi}}{\log_2 M \cdot B_{slot}} \right\rceil \quad (3.4)$$

em que, B_{wi} representa a largura de banda requerida pelo i -ésimo caminho óptico expressada em GHz, ε_{mod} é a eficiência espectral em bit/s/Hz e B_{slot} é largura de um *slot* em GHz. A Fig.12 ilustra o número de *slots* em função da largura de banda requerida pelo enlace óptico para cada tipo de formato de modulação. Aprecia-se que o número de *slot* disponível aumenta proporcionalmente com a largura de banda requerida. No entanto, esta condição não é sempre verificada havendo circunstância em que para uma mesma largura de banda requerida, diversos formatos de modulação podem possuir o mesmo número de slot. Esta percepção inspirou a ideia inovadora de um novo esquema de adaptação de modulação em rede óptica elástica. A proposta inovadora sendo parte das contribuições desta tese é introduzida no próximo capítulo.

A Tabela 2 indica a eficiência espectral, o número de *slots* e a máxima distância de transmissão de cada formato de modulação. Percebe-se que para uma largura de banda igual a 500 GHz, a modulação BPSK possui maior número de *slots*, seguido de QPSK e finalmente a 64QAM. Adicionalmente, as modulações de baixo nível de formato apresentam melhor desempenho em termos da máxima distância de transmissão (MDT).

Como mencionado no Capítulo anterior, cada tipo de FEC é escolhido em base ao valor da OSNR do caminho óptico correspondente. Assim, foram empregadas as equações abaixo para calcular a OSNR de um caminho óptico cujas explicações são as seguintes [20] : em (3.5)

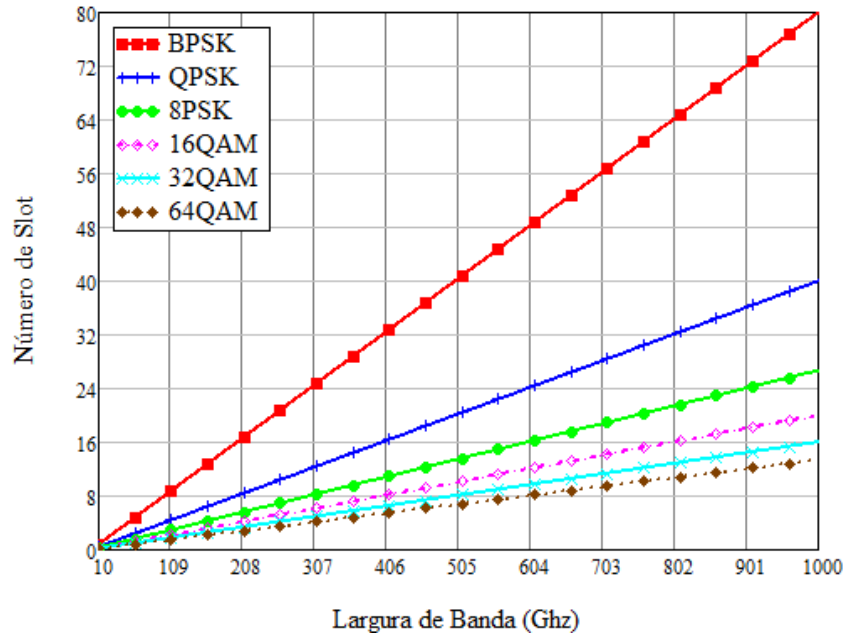

 Figura 12 – Número de *slots* versus largura de banda requerida.

Tabela 2 – Comparação do desempenho de cada modulação em termo de eficiência espectral, número de slots e MDT.

Formato de Modulação	Eficiência Espectral	Número de Slot para $Bw_{slot} = 500$ GHz	MDT (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

determina-se o ruído ASE do EDFA. Em (3.6) encontra-se o ruído ASE acumulada de enlace de fibra que contém os n EDFAs. Em (3.7) calcula-se a OSNR de um enlace, enquanto em (3.8) determina-se a OSNR de um caminho óptico que cruza vários enlaces, com base nas OSNRs dos enlaces individuais.

$$P_{Ase}(dBm) = -58(dBm) + G(dB) + NF_G(dB) \quad (3.5)$$

$$P_{Ase}(mW) = \sum_{i=1}^n P_{Ase}^i = \sum_{i=1}^n 10^{(P_{Ase}^i(dBm))/10} \quad (3.6)$$

$$OSNR_s = P_{out}/P_{Ase} = 1/P_{Ase}(mW) \quad (3.7)$$

$$\frac{1}{OSNR_{Total}} = \sum_s \frac{1}{\epsilon_s OSNR_s} \quad (3.8)$$

em que P_{Ase} indica a potência do ruído ASE de um amplificador óptico em dBm; P_{out} indica a potência de saída em um caminho óptico; G é o ganho de amplificação óptica; NFG é o valor nominal correspondente ao ruído quando o ganho de amplificação é G cujo valor está resumido na Tabela 1; S é o conjunto do enlace atravessado pelo caminho óptico; $OSNR_s$ é a OSNR total do conjunto de enlace atravessado pelo caminho óptico.

Os conceitos de modulação adaptativa e FEC adaptativos serão utilizados para redução de consumo de energia e melhorar a eficiência energética objetivos desta tese. Por fim vale lembrar que cada formato de modulação é escolhido de acordo à MDT enquanto cada tipo de FEC é escolhido de acordo à OSNR da distância do caminho óptico entre nó de origem e de destino.

3.3 Consumo de Energia e Eficiência Energética

3.3.1 Consumo de Energia

O gasto energético é calculado considerando o consumo de cada um dos blocos da Fig.9 transmissão, comutação, encaminhamento e recepção. Desta forma, para atender um pedido de conexão na EON, o consumo energético do i -ésimo caminho óptico pode ser calculado da seguinte forma [62]:

$$E_{Optical_i} = E_{TX_i} + E_{RX_i} + \sum_{q=1}^Q E_{EDFA(q)_i} + \sum_{r=1}^R E_{BV-OXC(r)_i} + \sum_{r=1}^R E_{Control(r)_i} \quad (3.9)$$

em que E_{TX_i} e E_{RX_i} são os gastos de energia do transmissor e do receptor respectivamente. $E_{EDFA(q)_i}$ é gasto de energia dos q th amplificadores EDFAs no caminho óptico (*booster, in-line*, no BV-OXCs e no receptor), $E_{BV-OXC(r)_i}$ é o gasto de energia de cada r th BV-OXCs. Finalmente, o consumo de energia do plano de controle é definido por $E_{Control(r)_i}$. A seguir, demonstra-se o cálculo de consumo de energia em cada um dos principais blocos.

3.3.1.1 Consumo de Energia no Transmissor

O consumo de energia E_{TX_i} no transmissor é calculado por [62]:

$$E_{TX_i} = \frac{R_i}{\eta_{EO}} (E_{FEC} + E_{P-S} + E_{DAC} + E_{MOD}) + \frac{\eta_T R_i}{2} + E_{CW} \quad (3.10)$$

sendo E_{FEC} , a energia consumida para a codificação FEC, E_{FEC} pode ser qualquer uma das três gerações de código corretor de erro. O modo de seleção do tipo de FEC depende da OSNR

do caminho óptico, E_{P-S} é a energia consumida para conversão em paralelo a série após a codificação, E_{DAC} é a energia consumida pelo DAC, E_{Mod} é o consumo de energia do modulador. Estes gastos de energia são considerados por *bit* de informação. η_{EO} é a eficiência de conversão de energia eletro-óptica, η_T é eficiência de transpônder e E_{CW} é a potência de saída de onda contínua de laser do MZM. Além disso, o consumo de energia da codificação FEC (E_{FEC}) baseia-se no consumo de energia de codificação LDPC (E_{LDPC}^{en} [62]) ou RS (E_{RS}^{en} [63]).

$$E_{LDPC}^{en}(lk) = \frac{[(l-k)(kc_g - 1)E_{op}^G + lE_{op}^R]}{k} \quad (3.11)$$

sendo l , o comprimento do código, k é o número de *bits* de informação por bloco de código, c_g é a razão média da matriz do gerador de uns por coluna, E_{op}^G e E_{op}^R é a energia média por operação de porta e acesso ao registrador, respectivamente.

$$E_{RS}(n, k) = \left(E_{RS}^{en} + \frac{E_{RS}^{dec}}{(1-P_b)^{L+h_s}} \right) + \left[\frac{B_a}{n_c(n-2t)m} \right] \times \left[n_c(n-2t)m + \left[\frac{h_s}{(n-2t)m} \right] + (n-2t)m \right] \quad (3.12)$$

sendo n , o número total de símbolos de código nos blocos codificados, L é o tamanho da carga útil, h_s é o tamanho do cabeçalho, B_a é o tamanho do arquivo transmitido, $n_c = \frac{L}{km}$ e $2t = n - k$ e $m = \log_2(n+1)$. E_{RS}^{en} é o gasto de energia para codificar o código RS, dado por:

$$E_{RS}^{en} = \frac{927t + 657}{n - 2t} \quad (3.13)$$

E_{RS}^{dec} é a energia gasta para decodificar o código RS dada na (3.14)

$$E_{RS}^{dec} = \frac{995t + 2697}{n - 2t} + [1 - (1 - P_b)^{nm}] \frac{104t^2 + 2474t + 11730}{n - 2t} \quad (3.14)$$

O consumo de energia dos outros elementos da (3.10) são [7, 62, 64]:

$$E_{DAC} = \frac{4F_D n_d F_S}{R_i} \quad (3.15)$$

$$E_{mod} = \frac{8V_{cc} V_{pp}}{R_T R_i} \quad (3.16)$$

$$P_{CW} = I_i \cdot 10^{L_{mod}/10} \quad (3.17)$$

sendo F_D , 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 modulador, V_{pp} é a tensão de oscilação de pico a pico do modulador, R_T é o modulador e a resistência de terminação do condutor, I_i é a potência de lançamento de entrada para o caminho i -ésimo e L_{mod} é perda de excesso óptico de MZM.

3.3.1.2 Consumo de Energia no Receptor

O consumo de energia no receptor P_{RX_i} pode ser calculado por [62]:

$$E_{RX_i} = \frac{R_i}{\eta_{EO}} (E_{LO} + E_{OE} + E_{TIA} + E_{ADC} + E_{DSP}) \quad (3.18)$$

sendo E_{LO} , 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 com consumo de energia de controle de ganho automático (AGC), E_{ADC} é o consumo de energia do conversor analógico-digital e E_{DSP} consumo de energia DSP. $E_{LO} = \frac{5}{\varepsilon F_S}$ dado em [pJ/bit] sendo ε a eficiência espectral que depende do formato da modulação. O consumo de energia de cada parâmetro da (3.18) é dados pelas (3.19), (3.20), (3.21) e (3.22) [7, 62, 64].

$$E_{OE} = \frac{16\mathfrak{R}V_{bias}P_{rec}}{\varepsilon F_S} \quad (3.19)$$

$$E_{TIA} = \frac{1.88}{R_i C_{LDPC} \log_2(M)} \quad (3.20)$$

$$E_{ADC} = \frac{4F_D n_{ADC} F_S}{R_i} \quad (3.21)$$

$$E_{DSP} = E_{CD} + E_{TR} + E_{PMD} + E_{CR} + E_{DEC} \quad (3.22)$$

sendo \mathfrak{R} , a responsividade do fotodiodo, V_{bias} a tensão de polarização do fotodiodo, P_{rec} é a potência recebida, C_{LDPC} é a taxa de código, tamanho da constelação M , n_{ADC} é a resolução do ADC, E_{CD} é o consumo de energia para compensação CD, E_{TR} é o consumo de energia para TR, E_{PMD} é o consumo de energia para compensação de PMD, E_{CR} é o consumo de energia para CR e E_{DEC} é o consumo de energia para decodificação. O E_{DEC} é representado por E_{LDPC}^{dec} e E_{RS}^{dec} para os códigos LDPC e RS, respectivamente. Estes consumos de energia são considerados por *bit* de informação. A descodificação LDPC é realizada no bloco DSP e o consumo de energia de descodificação é avaliado considerando a frequência de amostragem F_S como $E_{LDPC}^{dec} = \frac{172}{\varepsilon F_S}$ expressado em pJ/bit; O termo E_{RS}^{dec} foi definido na (3.14).

3.3.1.3 Consumo de Energia no Amplificador EDFA

O consumo de energia do amplificador óptico no nó óptico e a configuração em linha (*in-line configuration*) considerando AGC é [7]:

$$E_{EDFA_i} = \frac{P_{in}(G_{amp}(\omega) - 1)}{\eta_E \eta_{PCE}} \quad (3.23)$$

sendo P_{in} , a potência óptica de entrada do amplificador, η_{PCE} a eficiência de conversão de potência do amplificador, η_E é a eficiência de conversão de energia do circuito de controle e gerenciamento do amplificador incluindo os controladores de temperatura e o laser de bombeamento.

O termo de ganho espectral G_{AMP} é dado [15]:

$$G_{amp}(\omega) = \frac{G_0(\omega)}{1 + P_{out}/P_{sat}} \quad (3.24)$$

sendo $G_0(\omega)$, o ganho espectral não saturado do amplificador, P_{out} é potência óptica na saída do amplificador e P_{sat} é a potência óptica de saturação do amplificador. Além disso, G_{amp} depende da potência óptica na entrada do amplificador.

O consumo de energia da arquitetura WSS, BV-OXC independe do formato da modulação, do tipo de código FEC e da carga da rede óptica. Neste caso, o consumo é um valor fixo. Como nesta tese o objetivo é desenvolver novas técnicas visando reduzir o consumo de energia, então os gastos energéticos fixos são desconsiderados.

3.3.2 Eficiência Energética em Rede Óptica Elástica

A eficiência energética em redes ópticas elásticas pode ser definida como a soma da razão da capacidade do canal de cada caminho óptico e a soma do consumo de energia destes caminhos ópticos. Da teoria de informação de *Shannon*, a capacidade de um canal pode ser descrita como a assíntota das taxas de transmissão de informação, o que pode ser conseguido com taxa de erro arbitrariamente baixa. A equação (3.25) define a eficiência energética para um caminho óptico [61].

$$E_{ff} = \frac{\sum_{i=1}^U (B_i \log_2(1 + \gamma_i/\Gamma_i))}{\sum_{i=1}^U E_{Optical_i}} \quad (3.25)$$

sendo B_i , a largura de banda do i -ésimo caminho óptico, $E_{Optical_i}$ é o consumo de energia do i -ésimo caminho óptico ilustrado na seção anterior, Γ_i é a constante *gap* que representa uma perda em relação ao limite de capacidade de *Shannon* [65]. O cálculo da E_{ff} poderia ser feito apenas para o i_{th} caminho óptico ou considerando todos os U caminhos ópticos na rede. Para a modulação não codificada, a constante *gap* pode ser expressa como [65]:

$$\Gamma_i = \frac{\Theta_i^2}{3} \quad (3.26)$$

sendo $\Theta = Q^{-1}(Pe)$, Pe é a probabilidade de erro de símbolo e Q^{-1} é a função inversa Q definida como $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ [65]. Finalmente, γ_i é a relação sinal-ruído (SNR) do i -ésimo caminho óptico. A formulação de SNR (γ_i), difere de OSNR Υ_i , por um fator de normalização

baseado nos modos de polarização fixa, da largura de banda de ruído e polarização de ruído. A relação de SNR e OSNR é medida como [59]:

$$\gamma_i = \frac{2B_i}{\rho R_{s,i}} \Upsilon_i \quad (3.27)$$

sendo B_i , a largura de banda de referência, neste trabalho foi optado que B_i seja 12,5 GHz, $R_{s,i}$ é a taxa de símbolos, ρ é o fator relacionado com a polarização multiplexada e é igual a 1 para um sinal polarizado individualmente e igual a 2 para um sinal de polarização multiplexada [66].

A OSNR Υ_i com o número de salto em um caminho óptico pode ser calculado da seguinte forma [66, 67]:

$$\Upsilon_i = \frac{I_i}{N_{ASE_i} + I_i \left(\frac{I_i}{I_{o,i}} \right)^2} - H_i \times N_{node,i} \quad (3.28)$$

sendo I_i , a potência de excitação para o i -ésimo caminho óptico. $N_{ASE_i} = 2GvR_iN_S$ com G , o ganho do amplificador EDFA, h é a constante de Planck, v denota a frequência de luz, R_i é a largura de banda do canal, N_S indica o número de spans, $N_{node,i}$ é a penalidade de potência de ruído do BV-OXC óptico e $I_{o,i}$ a intensidade não-linear. Os modelos baseados nas técnicas de perturbação permitem encontrar soluções analíticas aproximadas à equação de Schroedinger não linear (NLSE) mais simples.

Nesse sentido, a intensidade não-linear para o i -ésimo caminho óptico é formulada como [66]:

$$I_{o,i} = \sqrt{\frac{R_i D \Delta \lambda}{2\gamma_N^2 \ln\left(\frac{nN_c}{2}\right) L_{eff}}} \quad (3.29)$$

sendo D , o parâmetro de dispersão dado por $D = -2\pi C\beta/\lambda^2$, o parâmetro c é a velocidade de propagação de luz, β é a dispersão de velocidade de grupo, λ é o comprimento de onda, $\Delta\lambda$ é o espaçamento de canal, γ_N é o coeficiente de não linearidade de fibra, N_c é o número de canais e $L_{eff} = [1 - \exp(-2\alpha L_s)]/2\alpha$, sendo α , o coeficiente de perda de fibra e L_s o comprimento de spans. Todos os parâmetros citados de (3.29) devem ser computados para cada caminho óptico.

Os valores de cada um dos parâmetros da fibra óptica e das variáveis do consumo de energia são apresentados nos Anexos A e em Anexo B, respectivamente.

CAPÍTULO 4

4 Roteamento e Alocação de Espectro

4.1 Topologias de Redes

Serão apresentados cinco algoritmos para investigar e reduzir o consumo energético em redes EON, baseando-se nas técnicas de roteamento e alocação de espectro (*Routing and Spectrum Assignment* - RSA). O primeiro denominado de AM-RSA (*Adaptive Modulation Routing and Spectrum Assignment*) é baseado na modulação adaptativa, onde o formato de modulação é escolhido em função da distância máxima alcançada. No segundo algoritmo, denominado AFEC-RSA (*Adaptive FEC Routing and Spectrum Assignment*) o modelo de código FEC a ser utilizado é escolhido com base na OSNR, pois cada um dos códigos considerados nesta tese opera em diferentes intervalos de OSNR. O terceiro algoritmo denominado AMC-RSA (*Adaptive Modulation Coding Routing and Spectrum Assignment*), é uma técnica híbrida que opera na combinação dos dois algoritmos anteriores. O objetivo comum destes três algoritmos é a redução dos gastos energéticos mantendo uma ótima qualidade de transmissão (*Quality of Transmission* - QoT) e qualidade de serviço (*Quality of Service* - QoS). Antes de apresentar o pseudocódigo de cada algoritmo, as seguintes considerações são feitas: denota-se $N_i = 1, 2, 3, \dots, N_{max}$ (com N_i o conjunto de inteiros positivos), número de solicitações de conexões. Para cada pedido de conexão, K_i caminhos mais curtos podem ser selecionados entre os nós de origem e destino, com $K_i = 1, 2, 3, \dots, K_{max}$, d_i é a distância entre os nós de origem e o destino para um determinado caminho óptico, com $d_i < d_{i+1}$.

Para verificar a eficiência dos algoritmos propostos, foram realizadas simulações computacionais em cenários e topologias distintas como a rede nacional dos Estados Unidos (Fig.13) e a rede Alemã (Fig.14) [9, 61]. Para criar um cenário dinâmico, os pedidos de conexão chegam à EON seguindo o processo de *Poisson* com taxa média de chegada λ . O tempo de duração é distribuído exponencialmente. Para cada solicitação de conexão recebida, dois nós são selecionados aleatoriamente. Todos os nós são equiprováveis, ou seja, todos têm a mesma probabilidade de ser escolhido. Um nó é considerado como origem e o outro como destino. Os números de solicitações de conexão variam de 0 a 10000. Foram considerados todos os possíveis pares de nós na rede ($552 = 24 \times 23$ pares de nós para a rede dos EUA) e ($272 = 17 \times 16$ para a rede Alemã) e a solicitação de conexão seleciona um dado par de nós seguindo uma distribuição uniforme. Todos os nós intermediários entre origem e destino são considerados como saltos. Além disso, para garantir as mesmas condições de entrada para os algoritmos, um gerador de números aleatórios com uma semente constante foi considerado.

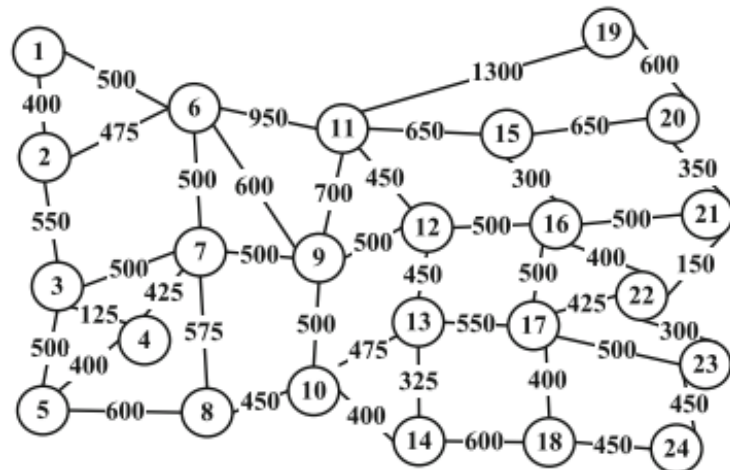


Figura 13 – Topologia da rede dos Estados Unidos.

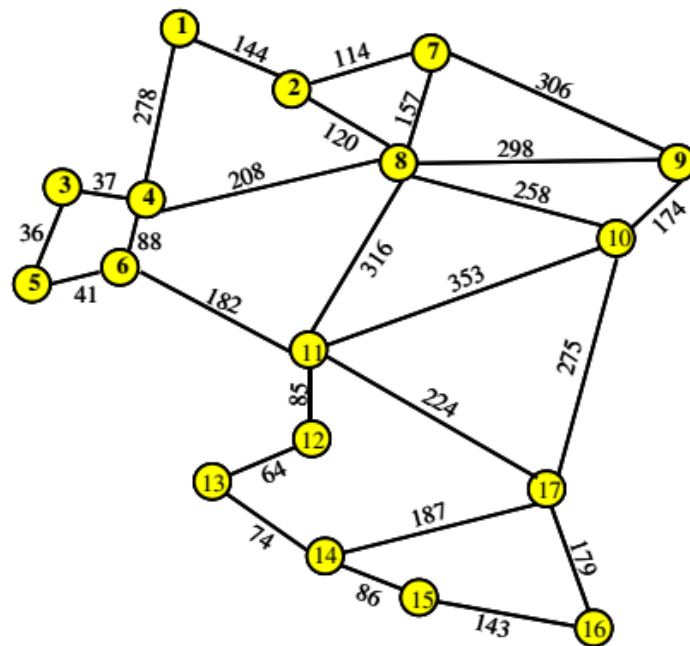


Figura 14 – Topologia da rede Alemã.

4.2 Modulação Adaptativa em Rede Óptica Elástica

O conceito de modulação adaptativa baseada na máxima distância de transmissão de cada modulação é utilizado com o objetivo de reduzir o consumo de energia em redes ópticas elásticas. A Fig.15 ilustra o esquema de alocação de modulação para cada caminho óptico. Com base nos diferentes tipos de modulação da Tabela.2, a estratégia de alocação adaptativa de modulação, baseada na distância, pode ser explicada no contexto de uma EON. Para destacar o benefício de desempenho do esquema de modulação adaptativa, foi considerada a estratégia de alocação uniforme baseada na distância de transmissão introduzida por [17].

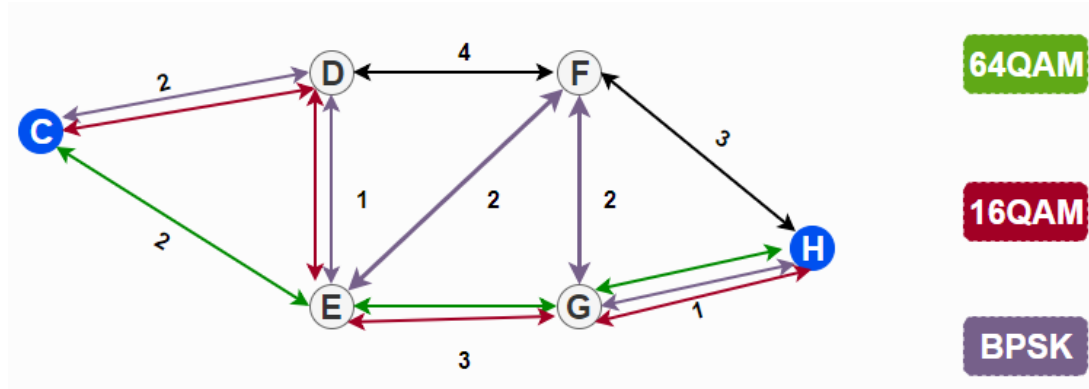


Figura 15 – Caminho óptico para alocação de modulação adaptativa.

Suponha-se que um pedido de conexão deve ser estabelecido entre os nós (C) e (H) de acordo o exemplo de topologia da Fig.15. Quando o algoritmo de Yen é executado para $K = 3$ ou seja os três menores caminhos entre estes nós, tem-se:

$$\begin{aligned}
 K_1 &= (C) \longrightarrow E \longrightarrow G \longrightarrow (H) \\
 K_2 &= (C) \longrightarrow D \longrightarrow E \longrightarrow G \longrightarrow (H) \\
 K_3 &= (C) \longrightarrow D \longrightarrow E \longrightarrow F \longrightarrow G \longrightarrow (H)
 \end{aligned}$$

Aqui, o caminho óptico K_3 tem a maior distância física (Ex: $d=1780$ km) e necessitaria-se da modulação BPSK cuja MDT (máxima distância de transmissão) é a mais elevada para estabelecimento da conexão. Se uma estratégia de atribuição de modulação fixa for aplicada (o que acontece convencionalmente) para todos os caminhos ópticos na rede, então, para os outros três caminhos ópticos, também serão atribuídos a mesma modulação.

No entanto, é um desperdício de espectro e desnecessário atribuir a modulação BPSK para os três percursos ópticos K_3 (1780 km), K_2 (670 km) e K_1 (340 km). De fato, com base nas atuais distâncias de cada caminho óptico ou *lightpath* (em inglês), as modulações BPSK e 16QAM são suficientes para operar nos caminhos ópticos K_3 , K_2 e K_1 para alcançar seus respectivos BERs requeridos. A proposta de estratégia de atribuição de modulação adaptativa introduzido pelos autores Wan *et al.* usam de forma eficiente o tipo de modulação de acordo ao atual comprimento de cada *lightpath* entre os nós de origem e destino [17]. Isto atribuiria a modulação BPSK ao *lightpath* K_3 , enquanto 16QAM seria suficiente para *lightpath* K_2 e 64QAM para *lightpath* K_1 .

Pode-se, estimar os custos totais de espectro requeridos pelas estratégias de atribuição de modulação adaptativa e fixa. Assumindo que cada caminho óptico precisa de 40 *slots* (exemplo da Tabela2) de frequência (*Frequency Slot* - FS) no exemplo da Fig.15, se a estratégia de alocação modulação fixa tradicional for aplicada a todos os percursos da rede, então, a número total necessária para todos os percursos ópticos seria $40 + 40 + 40 = 120$ FSs. Em contraste, se a

estratégia da modulação adaptativa for aplicada, então os FS gerais requeridos pelos três tipos de modulação são 40, 10 e 7, respectivamente. Isto implica que apenas um total de $40 + 10 + 7 = 57$ FSs seriam necessários, poupando assim 63 FSs em comparação com a abordagem fixa. Isso mostra como a estratégia de alocação de modulação adaptativa é eficaz na redução do número total de FSs utilizados [16].

No capítulo anterior, falou-se que para um pedido de conexão igual a 800km (conforme Fig.11) a largura de banda mínima requerida é 46 GHz usando (3.3). Neste caso, o número de *slot* será 4, 2, 2, 1, 1 e 1 quando as modulações BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM, 32QAM e 64QAM são utilizados respectivamente (ver Fig.16). Percebe-se que para uma mesma largura de banda de banda, as modulações 16QAM, 32QAM e 64QAM possuem o mesmo número de *slot*. De mesmo modo, as modulações QPSK e 8PSK possuem o mesmo número de *slot* igual a 2. A definição de modulação adaptativa introduzida por Wan *et al.* , alocaria a modulação 8PSK para atender a demanda [17]. No entanto, visto que ambas QPSK e 8PSK possuem o mesmo número de *slot* seria ideal escolher a QPSK. Esta escolha permite obter uma taxa de erro de *bit* menor, uma probabilidade de bloqueio reduzida, maior alcance óptico entre outros. Com base de tudo isso, a modulação ótima escolhida satisfaz os critérios de QoS e QoT. A Tabela 3 resume o número de slot por formato de modulação para diferentes larguras de banda. Aprecia-se que em cada largura de banda requerida, existem pelo menos duas modulações com mesmo número de slot para uma determinada largura de banda.

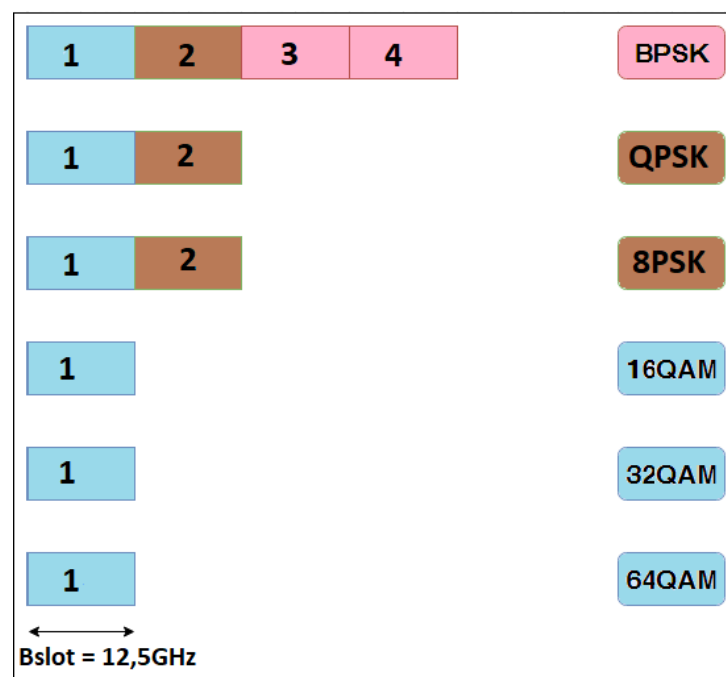


Figura 16 – Número de *slots* utilizado por cada modulação para uma $Bw_i = 46$ GHz.

Conforme a Tabela 3 a largura de banda requerida pode ser calculada da seguinte forma:
 $Bw_i = 2nB_{slot}$ sendo B_{slot} a largura de banda de um *slot* que 12,5 GHz e n um número inteiro.

Tabela 3 – Número de *slots* em diferentes frequência requerida para as modulações $M - PSK$ e $M - QAM$.

Formato de Modulação	Frequência Requerida	$Bw_i = 25\text{ GHz}$	$Bw_i = 50\text{ GHz}$	$Bw_i = 75\text{ GHz}$	$Bw_i = 100\text{ GHz}$	$Bw_i = 150\text{ GHz}$
	BPSK		2	4	6	8
QPSK		1	2	3	4	6
8PSK		1	2	2	3	4
16QAM		1	1	2	2	3
32QAM		1	1	2	2	3
64QAM		1	1	1	2	2

O problema de alocação de espectro em rede óptica elástica pode ser dividido em dois estágios:

1. A criação do caminho óptico com número suficiente de frequência slot entre os nós de origem e de destino.
2. A determinação da modulação ou codificação apropriada para cada caminho óptico de acordo um dado taxa de *bit*.

Com o intuito de resolver o problema exposto acima, o presente trabalho introduz uma proposta inovadora trazendo como propósito o de melhorar o desempenho da rede óptica elástica. A proposta divide-se em dois estágios: em um primeiro instante, é apresentado um algoritmo cujo objetivo é buscar e escolher a modulação ótima para cada caminho óptico. Em segundo instante, o problema de RSA é resolvido. No primeiro estágio é proposto o algoritmo LMA (*Lower Modulation Assignment*) que busca escolher a modulação com menor número de símbolo. O LMA funciona da seguinte forma: dado um pedido de conexão, recebe o pedido de conexão com distância d_i entre os nós de origem e destino $G(s, d)$ (G : é o tipo de rede, s é o nó de origem e d é o destino). Em seguida a largura de banda requerida B_{W_i} é calculada. Esta largura de banda B_{W_i} pode ser determinada também pela Fig.11 ou através de (3.3). Para esta largura de banda, pode-se identificar a modulação correspondente M_i . Após disso, calcula-se o número de *slots* N_{s_i} necessários para este pedido de conexão. Também calcula-se o número de slot $N_{s_m} = \{N_{s_1}, N_{s_2}, \dots, N_{s_{m-1}}\}$ necessários se as outras modulações fossem utilizadas. Posteriormente aos cálculos efetuados, compara-se N_{s_i} com N_{s_m} . Selecionam-se todas as $M_m = \{M_1, M_2, \dots, M_{m-1}\}$ modulações que apresentam mesmo número de *slot* que a M_i e descarta-se aquelas cujos N_{s_m} é diferente de N_{s_i} . Em fim, a modulação ótima M_{mo} escolhida é a menor ou seja aquela que tiver menor número de símbolo no seu formato.

$$M_{mo} = \text{Min} \{M_i \cap M_m\}$$

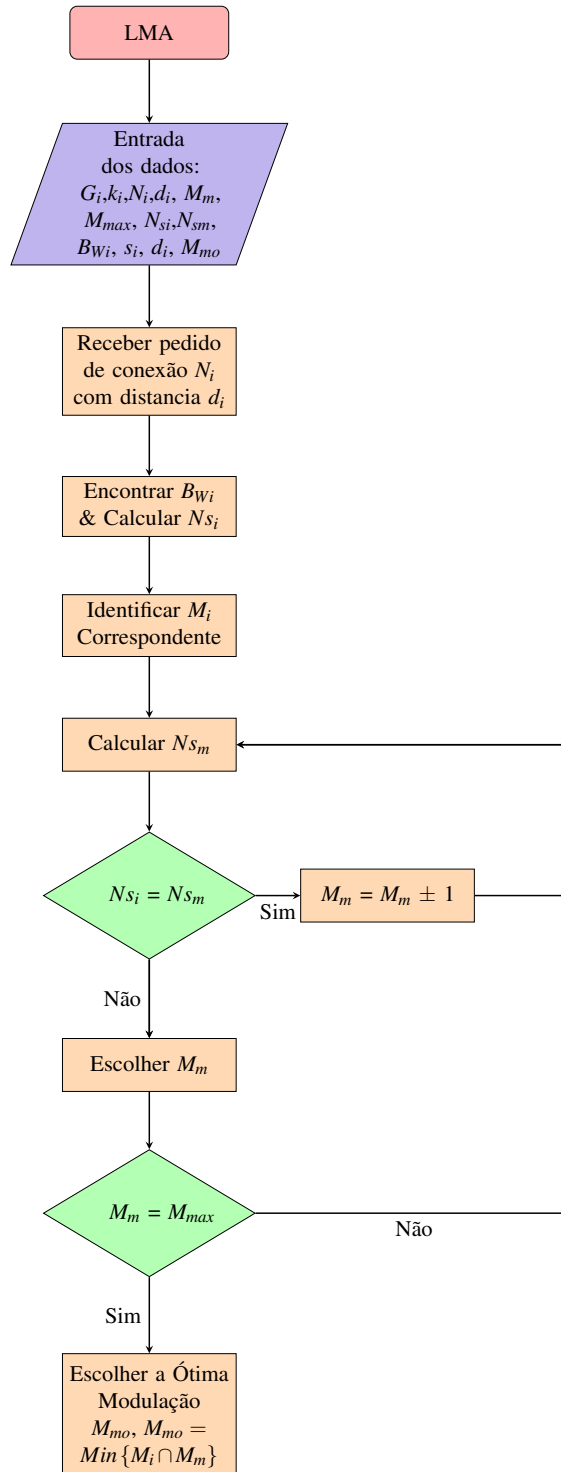


Figura 17 – Algoritmo LMA (Lower Modulation Assignment) para escolha da modulação ótima.

O fluxograma do algoritmo da escolha da modulação com menor número de símbolo é ilustrado na Fig.17.

Uma vez que a modulação ótima M_{mo} é encontrada, pode-se introduzir o algoritmo AM-RSA. Ante tudo, examina-se as seguintes situações: Suponha-se um pedido de conexão precisa ser estabelecida entre os nós (22) e (17) usando a topologia da rede americana. Para $G_t(s, d)$, $t = 1 \implies$ Topologia da Rede Americana, $t = 2 \implies$ Topologia da Rede Alemã. O vetor $G_t(s, d) = G_1(22, 17)$ significa que foi escolhida a topologia da rede americana com nó de origem (22) e destino (17). Aplicando-se o algoritmo de Yen, K_j menores caminhos podem ser escolhidos. Se $K_{max} = 3$, então os três menores caminhos serão:

$$K_1 = (22) \longrightarrow (17)$$

$$K_2 = (22) \longrightarrow 23 \longrightarrow (17)$$

$$K_3 = (22) \longrightarrow 21 \longrightarrow 16 \longrightarrow (17)$$

A largura de banda requerida para cada um dos três K_j caminhos é 72 GHz, 48 GHz e 29 GHz, os números de slot são 2, 2, 3 e as modulações correspondentes serão 32QAM, 8PSK e QPSK respectivamente usando a Equação (3.3). O algoritmo de Wan *et al.* baseado no *First-Fit* escolheria o caminho K_1 [17]. Embora que o caminho K_1 tenha menor número de salto e menor distância, seria apropriado escolher o caminho K_2 que tem a modulação com menor número de símbolos uma vez que ambos os caminhos requerem mesmo número de *slots*. A técnica de escolha do caminho com modulação ótima permite melhorar o desempenho da rede óptica elástica em termo de probabilidade de bloqueio, eficiência energética, etc.

Uma outra vantagem do algoritmo proposto pode ser abordada da seguinte forma: Considera-se um pedido de conexão que precisa ser estabelecida entre os nós (23) e (15) usando a rede alemã. O vetor $G_t(s, d) = G_1(23, 15)$ neste caso. Se aplica-se o algoritmo de Yen, K_j menores caminhos podem ser escolhidos. Se $K_{max} = 3$, então os três menores caminhos serão:

$$K_1 = (23) \longrightarrow 22 \longrightarrow 21 \longrightarrow 16 \longrightarrow (15)$$

$$K_2 = (23) \longrightarrow 17 \longrightarrow 16 \longrightarrow (15)$$

$$K_3 = (23) \longrightarrow 22 \longrightarrow 21 \longrightarrow 20 \longrightarrow (15)$$

A largura de banda requerida para cada um dos três K_j caminhos é 47 GHz, 41 GHz e 29 GHz e os números de slot são 3, 3, 4 respectivamente sendo que todas usam a mesma modulação BPSK. O algoritmo de Wan *et al* [17] baseado no *First-Fit* escolheria o caminho K_1 . No entanto, é claro que o caminho K_2 tem o menor número de saltos. Por este motivo o algoritmo LMA proposto escolheria o segundo que é K_2 .

Com tudo o exposto acima, sem perda de generalidade, o novo algoritmo AM-RSA baseado na distância adaptativa e o número de *slots* é introduzido. A ideia principal do algoritmo AM-RSA é a seguinte: para cada pedido de conexão N_i em uma rede G_i , dois nós são escolhidos aleatoriamente, um como origem e outro como destino, logo o algoritmo de Yen é executado

com o intuito de escolher $K_j = \{K_1, K_2, \dots, K_{max}\}$ menores caminhos ópticos. Nesta tese, K_{max} é igual a 7 o que significa para cada N_i , 7 menores caminhos são escolhidos. Em seguida, se avalia se para cada K_j se cumpre os critérios da QoT sendo $\frac{d_i}{\psi}$ comparada com δ . O caminho K_j é escolhido se e somente se $\frac{d_i}{\psi} \leq \delta$. Caso não se cumprir este critério, o caminho K_j é bloqueado. Os outros K_{j-1} que tal vez não fossem bloqueados são ordenados de forma crescente em termo de saltos e em seguida escolhe-se aquele que possui o menor número de saltos. Para este escolhido, executa-se o algoritmo LMA para alocar de forma adaptativa a modulação com ótima correspondente. Uma vez feito o cálculo, o consumo de energia para este caminho $E_{c_{K_j}}$ é calculado. Adicionalmente, o consumo de energia de cada um dos outros $E_{c_{K_{j-1}}}$ é calculado respetivamente e os valores são salvos em um *buffer*. Em seguida, o consumo de energia de $E_{c_{K_j}}$ é comparado individualmente com os $E_{c_{K_{j-1}}}$ e escolhe-se $E_{c_{op}}$ que representa o consumo de energia ótimo. Em outras palavras, o menor de todos os calculados. Os procedimentos anteriores são repetidos para todos os N_i até $N_i = N_{max}$. Um caminho óptico pode ser bloqueado também caso que nenhuma modulação for encontrado para alocação.

A proposta AM-RSA permite melhorar o desempenho da rede óptica em diversos cenários tais como: a eficiência energética da rede óptica é melhorada, os gastos energéticos são reduzidos, a eficiência espectral é melhorada, a probabilidade de bloqueio é reduzida etc. Esta proposta abre um novo caminho para futuras pesquisas, trazendo novas soluções para o problema de roteamento e alocação de espectro em rede óptica elástica. Baseada nesta nova estratégia, o algoritmo AM-RSA foi implementado cujo pseudocódigo está descrito na Fig.18.

Suponha-se que não haja bloqueio de pedido de conexão na rede óptica. Em outras palavras, todos os pedidos de conexão sejam atendidos. Em primeira instância, o impacto do formato da modulação sobre o consumo de energia foi investigado utilizando a rede Alemã. A Fig.19 ressalta o consumo de energia por *bit* de informação em função de número de conexões na rede óptica elástica. Foi considerado que uma modulação fixa é utilizada para todos os n pedidos de conexão. Percebe-se que o consumo de energia diminui a medida que aumenta-se o esquema de constelação da modulação. A modulação BPSK apresenta maior gasto de energia enquanto a modulação 64QAM possui o menor consumo energético. Isso pode se explicar pelo fato que a modulação BPSK requer mais número de *slot* que QPSK, 8PSK, ... 64QAM para o mesmo pedido de conexão.

Na Fig.20 apresenta a eficiência energética (Gbps/J) da rede óptica elástica para cada uma das modulações. A modulação com maior símbolo no esquema de constelação apresenta maior eficiência energética. Do ponto de vista analítico, se a modulação BPSK for utilizada para atender os três pedidos de conexão da Fig.15, o gasto de energia total seria aproximadamente $(518+518+518)J/bit = 1554 J/bit$. No entanto, considerando a técnica adaptativa, o consumo energético será então: $(518+235+213)J/bit = 966J/bit$ ou seja uma redução de 588J/bit de consumo energético. A Tabela 4 ilustra a eficiência de energia para as modulações M-PSK e M-QAM consideradas nesta tese. Por um lado, percebe-se de forma geral para um mesmo alcance

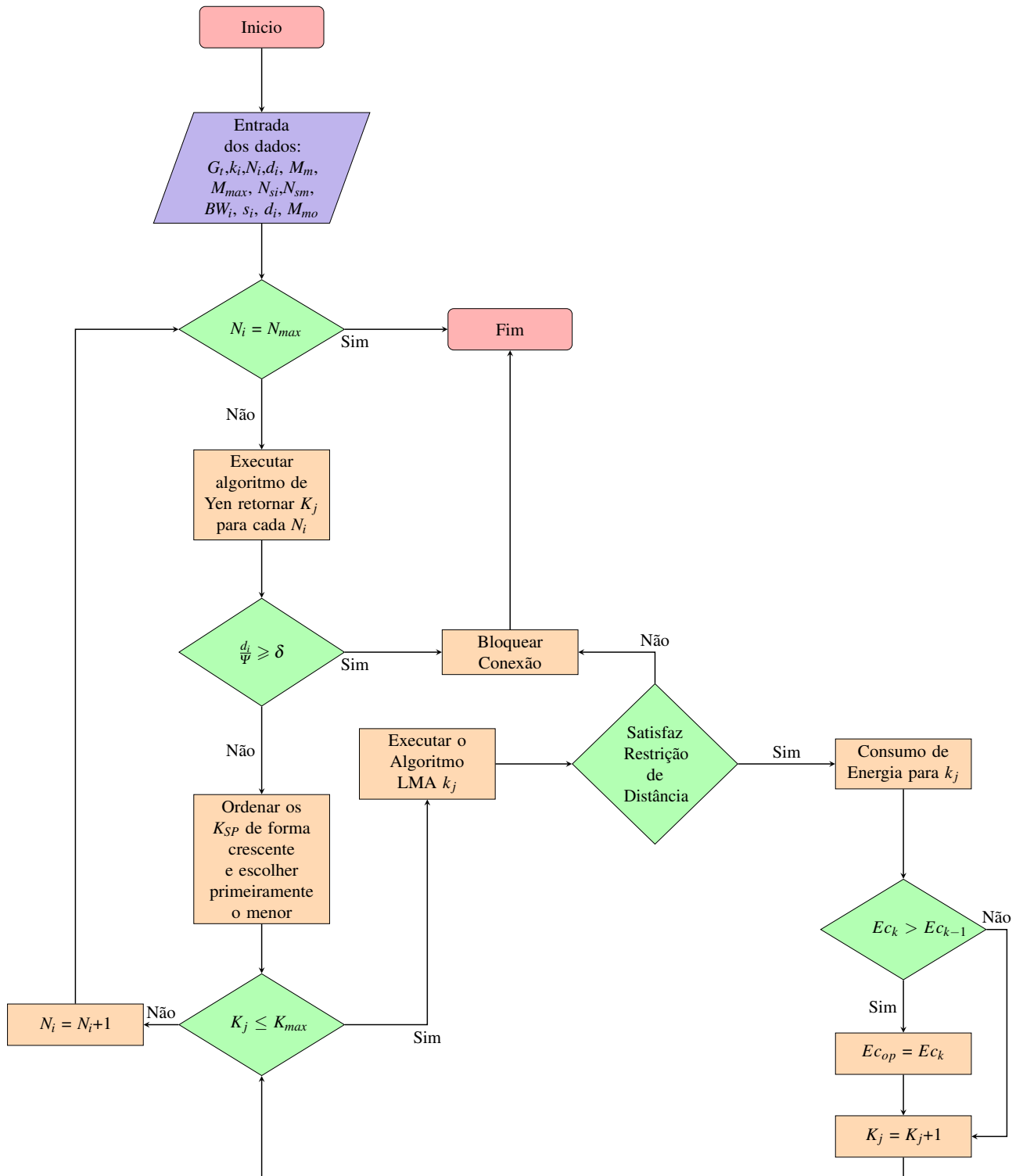


Figura 18 – Algoritmo AM-RSA para melhorar o desempenho da rede óptica elástica.

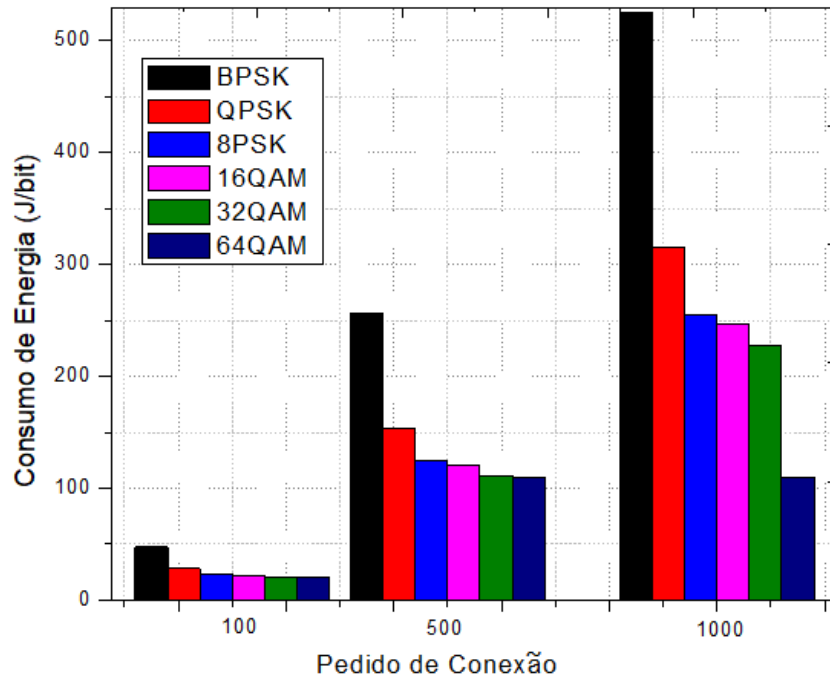


Figura 19 – Consumo de energia em função de número de conexões para MPSK e MQAM usando a rede Alemã.

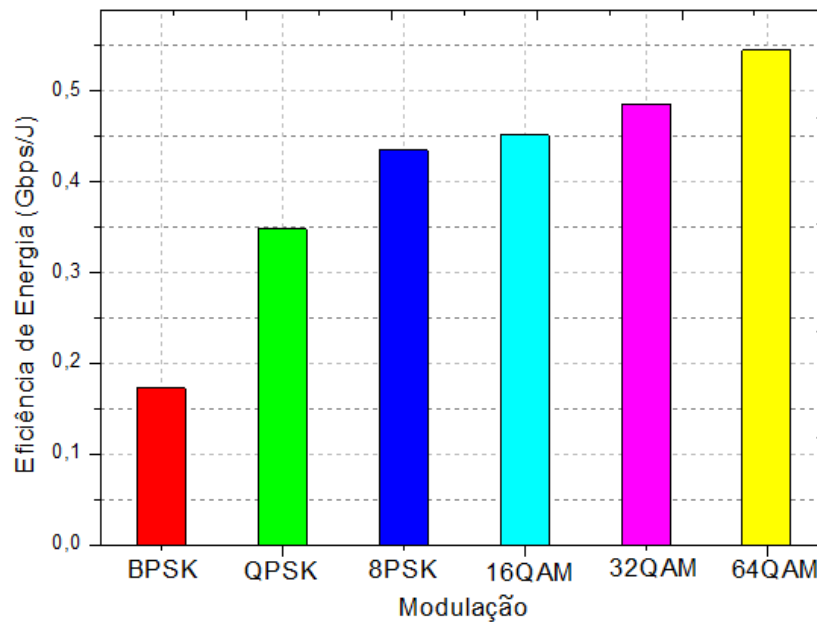


Figura 20 – Eficiência de energia para cada formato de Modulação.

óptico, a eficiência de energia na rede óptica cresce com o aumento de número de símbolos no esquema de constelação da modulação. Por outro lado, a eficiência de energia diminui com a distância entre dois nós. Por este motivo, no estudo das redes ópticas elásticas seria melhor um balanço entre a escolha do formato da modulação e a distância entre dois nós com o intuito de não comprometer o seu desempenho.

Tabela 4 – Eficiência de energia para diferentes Modulações.

Origem	Destino	BPSK	QPSK	8PSK	16QAM	32QAM	64QAM
18	22	95,88	119,16	121,74	160,16	186,94	187,31
1	9	93,2	112,72	113,36	166,19	174,61	175,89
23	15	67,73	82,74	83,32	148,02	148,51	151,73
14	7	76,80	91,98	91,16	150,08	150,04	153,07
4	12	78,74	93,9	93,09	150,66	150,89	153,42

O impacto da taxa de transmissão (*Transmission Rate* - TR) é analisado na Fig.21 através do algoritmo AM-RSA. Suponha-se que a taxa de transmissão na EON para atender as demandas seja TR = 50; 100 e 200 Gbps, respectivamente. Aprecia-se que o consumo de energia aumenta proporcionalmente com a taxa de transmissão na rede óptica elástica. O consumo de energia é maior com TR = 200 Gbps, no entanto, os dados são transmitidos em alta taxa óptico.

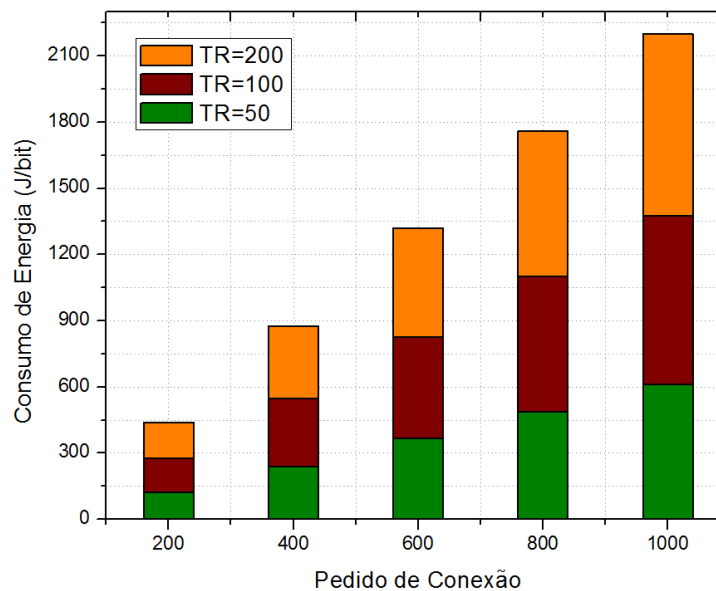


Figura 21 – Consumo de energia em função do pedido de conexão para TR = 50; 100 e 200Gbps.

4.2.1 Análise de Desempenho dos Algoritmos AM-RSA, MH e SP

O desempenho do proposto algoritmo AM-RSA é comparado com os algoritmos "Menor Caminho" (*Shortest Path* - SP) e "Menores Saltos" (*Minimum Hops* - MH). O primeiro *Shortest Path* (SP) seleciona o menor caminho óptico e utiliza uma modulação fixa para atender todos os pedidos de conexão que chegam na rede óptica elástica. O segundo algoritmo de comparação *Minimum Hops* - MH considera o caminho óptico com menor número de saltos e utiliza a modulação fixa para qualquer pedido de conexão.

De forma resumida, cada algoritmo opera da seguinte forma:

- SP: emprega modulação fixa para todas as solicitações de conexão recebidas e usa o algoritmo Dijkstra para selecionar o caminho mais curto. Finalmente, o consumo de energia para o caminho mais curto é calculado.
- MH: seleciona o *lightpath* com saltos mínimos e adota modulação fixa para todos os pedidos de conexão recebidos; Finalmente, o consumo de energia do caminho de luz selecionado é calculado.
- AM-RSA: executa o algoritmo de Yen [68] para selecionar k -caminho mais curto. Depois disso, aloca a modulação ideal para cada k caminho mais curto selecionado. Finalmente, seleciona-se o caminho óptico k que tem o menor consumo de energia. O valor de K não é fixo, ao contrário, muda de uma conexão a outra com o fim de otimizar o gasto de energia. Para cada pedido de conexão, o algoritmo avalia e calcula o gasto de energia para cada K e comparando com $K-1$.

A Fig.22 apresenta o consumo de energia (em J/bit) como uma função de número de conexão para cada um dos algoritmos. Foi adotada a topologia da rede óptica americana. Por um lado, observa-se que o gasto energético na rede óptica elástica aumenta proporcionalmente com o crescimento de número de pedidos de conexão que chegam à rede óptica para qualquer tipo de algoritmo. Por outro lado, percebe-se que o algoritmo proposto AM-RSA apresenta menor consumo de energia em comparação aos algoritmos SP e MH. Isto pode ser explicado pelo fato que o algoritmo AM-RSA seleciona o "melhor" formato de modulação adaptativamente para cada pedido de conexão de acordo com a distância física do caminho óptico atravessado. Além disso, o algoritmo adapta o valor, k , de acordo com as solicitações de conexões. O algoritmo compara o gasto de energia de um caminho óptico com o anterior, reduzindo o gasto de energia consideravelmente.

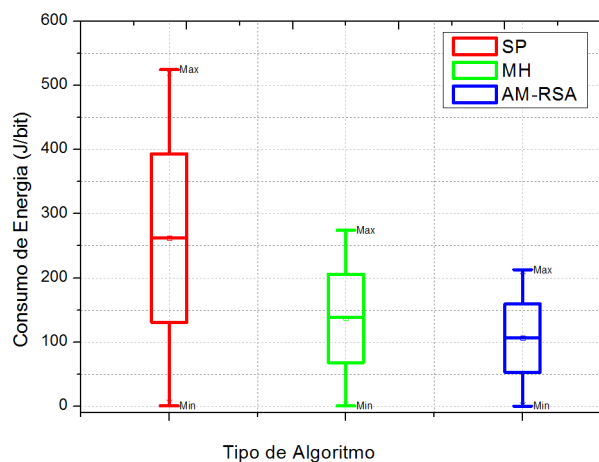


Figura 22 – Consumo de energia em função de número de conexões AM-RSA, SP-RSA e MH-RSA.

A eficiência de energia em função da carga da rede óptica elástica foi calculada e é apresentada na Fig.23. Observa-se, mais uma vez, que o algoritmo proposto desempenha melhor que os outros algoritmos em termos da eficiência de energia. O melhor desempenho do algoritmo AM-RSA é justificado pelo fato que ele adota o caráter de alocação adaptativa do formato de modulação diferentemente dos algoritmos SP e MH que empregam uma modulação fixa para qualquer pedido de conexão.

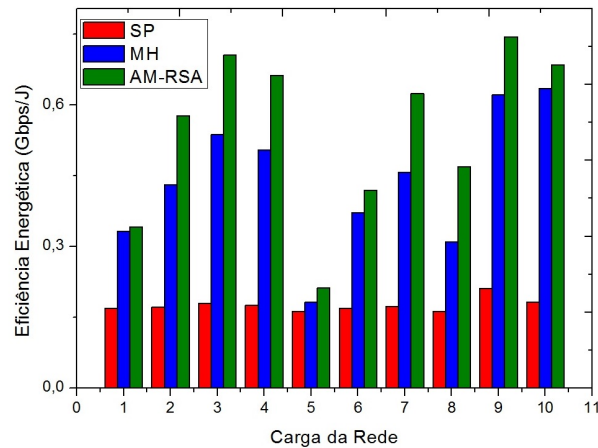


Figura 23 – Eficiência de energia em função de número de conexões para os algoritmos SP, MH e AM-RSA.

O desempenho da técnica AM-RSA tem sido avaliado considerando a potência de excitação do amplificador óptico definido pela Eq.(3.28). Percebe-se que o consumo de energia é quase constante para os qualquer tipo de algoritmo no intervalo de -20dBm a 5dBm. Quando a potência de excitação do transmissor é maior do que 5dBm, o gasto energético para os três algoritmos começa a crescer seguindo uma forma exponencial. O crescimento é mais rápido na técnica SP enquanto mais lento para a técnica AM-RSA. Assim, mais uma vez a técnica de AM-RSA apresenta melhor desempenho em comparação às duas outras técnicas.

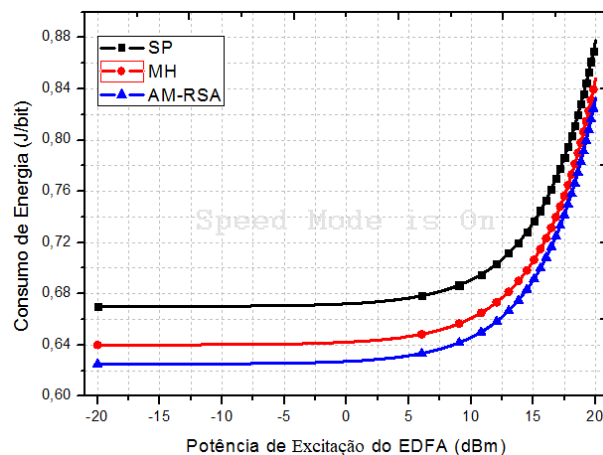


Figura 24 – Consumo de energia versus potência de excitação do amplificador EDFA.

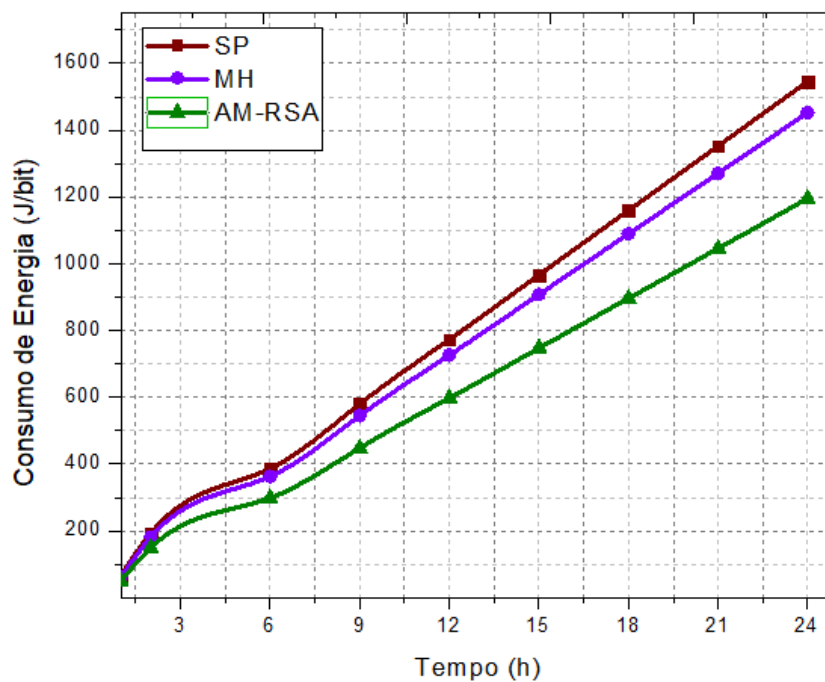


Figura 25 – Consumo de energia em função do tempo para o algoritmo SP, MH e AM-RSA.

O consumo de energia aumenta com o tempo em todos os algoritmos. No entanto, percebe-se que a estratégia proposta supera os algoritmos SP e MH conforme indica a Fig.25.

4.2.2 Análise de Desempenho dos Algoritmos AM-RSA e mAdap

Agora, será considerado que há possibilidade de ocorrer bloqueio na rede óptica elástica. Há bloqueio de conexão quando não for possível encontrar nenhuma modulação que possa atender determinado pedido de conexão ou o número máximo de bloqueio permitido na EON for atingida. A probabilidade de bloqueio é um ótimo parâmetro para mensurar o quão eficiente é uma técnica em diversos cenários de análise de desempenho. Ela é definida como a relação entre o número de pedido de conexão rejeitado e o número total que chega na EON. Assim, o desempenho da técnica AM-RSA foi comparada com a técnica de modulação adaptativa introduzida por Wan *et al* [17]. A Fig.26 mostra claramente como a técnica proposta desta tese desempenha melhor que o algoritmo mAdap. O bom desempenho da técnica AM-RSA explica-se pelo fato de que há uma adaptação da largura de banda de forma dinâmica, o que permite aumentar o alcance de cada modulação e conduz à redução da probabilidade de bloqueio. Ao contrário, nas técnicas comparadas, quando nenhuma modulação for encontrada, a conexão é bloqueada.

A Tabela 5 resume a largura de banda necessária, a relação sinal ruído óptico correspondente (*OSNR*) e o consumo de energia de cada rota para os algoritmos *mAdap* e *AM-RSA*. Os resultados mostram que, para o mesmo pedido de conexão, a largura de banda usada é menor quando o *AM-RSA* é adotado. O consumo de energia também é reduzido com o algoritmo *AM-RSA*

Tabela 5 – Tabela comparativa da largura de banda requerida, OSNR e consumo total de energia para os algoritmos mAdap e AM-RSA.

Origem	Destino	Algoritmo	Bw (GHz)	OSNR (dB)	EC _o (J/bit)
21	22	mAdap	118,95	8,08	0,28
		AM-RSA	55,27	10,26	0,15
7	5	mAdap	44,4	8,76	0,37
		AM-RSA	40,51	11,14	0,26
12	18	mAdap	33,93	10,53	0,41
		AM-RSA	14,21	13,06	0,39
20	11	mAdap	47,25	8,89	0,38
		AM-RSA	33,62	11,57	0,36

usado na rede óptica elástica. Embora o OSNR no AM-RSA seja maior do que no *mAdap*, o algoritmo proposto ainda é preferido, uma vez que satisfaz a qualidade do serviço e a qualidade do requisito de transmissão. O uso da largura de banda disponível pode ser salvo em até 60 % em alguns casos e o consumo de energia pode ser reduzido em até 20 %. A relação sinal ruído óptico (OSNR) é definida pela relação entre a potência do sinal de entrada nos EDFA, BV-OXC e a potência na saída neles. Como a potência na entrada é uma constante (consideração feita neste trabalho), o valor da OSNR depende então do ruído nos diferentes equipamentos que dependem da taxa de transmissão, número de *spans*, ganho no EDFA etc. Menor valor da OSNR significa que a potência na saída foi alta uma vez que a potência na entrada é uma constante. Isso justifica os valores altos da OSNR no algoritmo AM-RSA. Além disso, quando maior for a OSNR, menor é a interferência do ruído na transmissão.

A eficiência energética é calculada dividindo a demanda total de tráfego atendida com sucesso na rede pelo consumo total da rede de energia. A Fig.27 destaca a eficiência energética para N_i demandas de conexão para os algoritmos *mAdap* e AM-RSA. A partir desta figura,

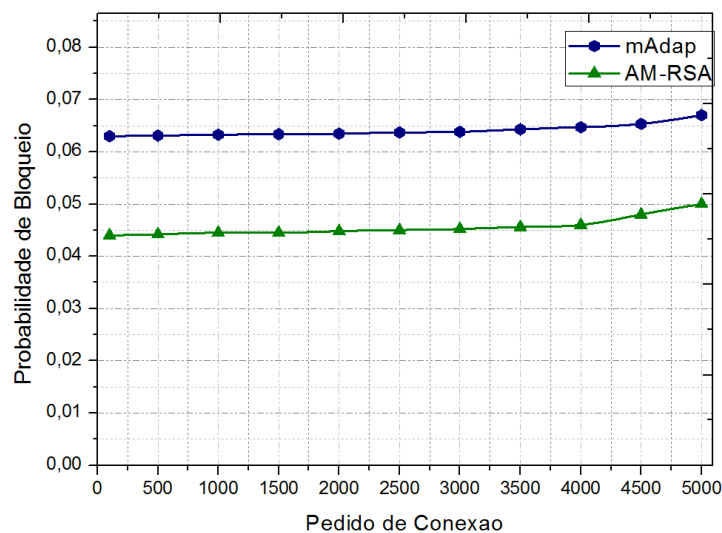


Figura 26 – Probabilidade de bloqueio em função de número de conexões AM-RSA e mAdap.

aprecia-se que o algoritmo *AM-RSA* supera o algoritmo *mAdap* com eficiência média de energia 2,2 e 1,6, respectivamente. O sistema EON é melhorado em até 27 % de maneira aproximada quando *AM-RSA* é empregado. Isso pode ser explicado pelo fato de que o algoritmo proposto introduz melhores condições, alocando a largura de banda necessária apropriada Bw_i e o formato de modulação. Assim, mais pedidos de conexões podem ser arquivados e o consumo de energia é reduzido.

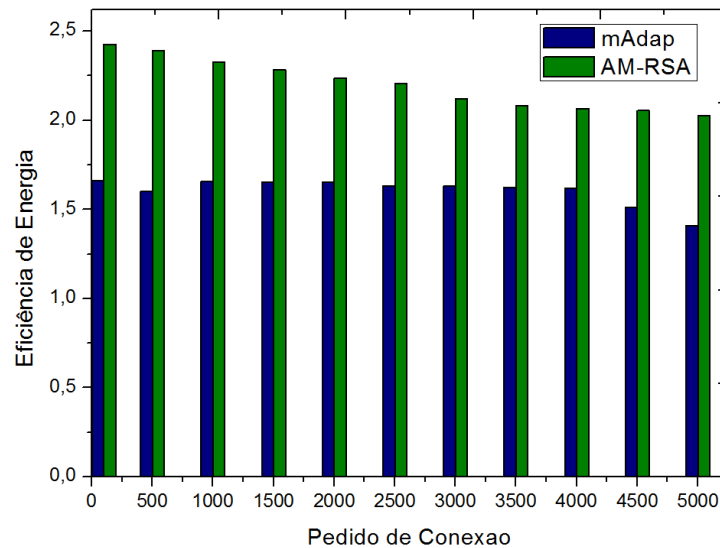


Figura 27 – Eficiência energética para N_i demanda de conexão para os algoritmos *mAdap* e *AM-RSA*.

4.3 FEC Adaptativo em Rede Óptica Elástica

Nesta subseção será abordado o conceito do código FEC em rede óptica elástica. Com base nos três tipos de FEC da Tabela 1, a estratégia de alocação adaptativa de FEC baseada na OSNR pode ser explicada no contexto de uma rede óptica elástica. Como no contexto de modulação adaptativa, para destacar o benefício de desempenho do esquema de FEC adaptativo, a estratégia de alocação uniforme de FEC baseada na OSNR também foi considerada. O exemplo da Fig.28 mostra uma topologia de rede de teste com 3 caminhos ópticos de trabalho $\textcircled{0} \Rightarrow 1 \Rightarrow 2 \Rightarrow 3 \Rightarrow \textcircled{5}$, $\textcircled{0} \Rightarrow 7 \Rightarrow 6 \Rightarrow \textcircled{8}$ e $\textcircled{0} \Rightarrow \textcircled{8}$. Como o caminho óptico 0-1-2-3-5 tem o menor OSNR (isto é, $\text{OSNR}_3 = 10$ dB), segundo Shen *et al.*, seria necessário o FEC tipo 3 para este caminho uma vez que possui maior NCG (isto é, LDPC (4161, 3431, 0,825)). Se uma estratégia de atribuição de FEC fixa for aplicada para todos os caminhos ópticos na rede, então os outros 2 caminhos ópticos também serão atribuídos ao mesmo tipo de FEC.

Não obstante, é um desperdício e desnecessário atribuir o FEC tipo 3 para os três percursos ópticos $\textcircled{0} \Rightarrow 1 \Rightarrow 2 \Rightarrow 3 \Rightarrow \textcircled{5}$, $\textcircled{0} \Rightarrow 7 \Rightarrow 6 \Rightarrow \textcircled{8}$ e $\textcircled{0} \Rightarrow \textcircled{8}$. De fato, com base nos atuais OSNRs de cada *lightpath*, FEC tipo 1, tipo 2 são suficientes para operar nos caminhos ópticos $\textcircled{0} \Rightarrow 1 \Rightarrow 2 \Rightarrow 3 \Rightarrow \textcircled{5}$, $\textcircled{0} \Rightarrow 7 \Rightarrow 6 \Rightarrow \textcircled{8}$ e $\textcircled{0} \Rightarrow \textcircled{8}$ para alcançar

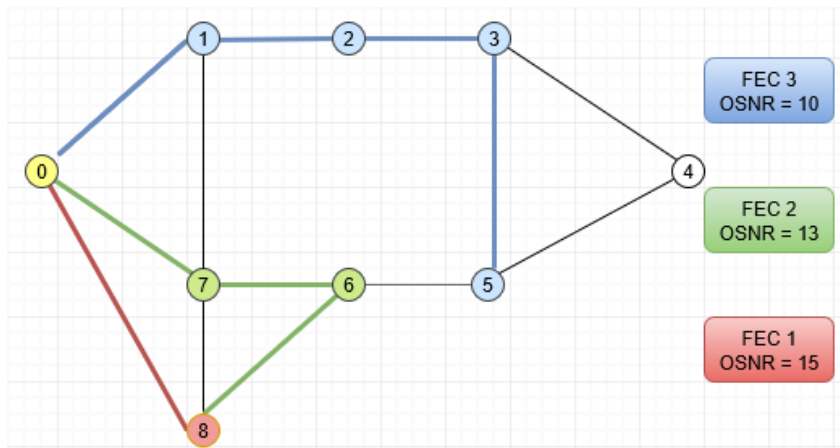


Figura 28 – Caminho óptico para alocação de FEC adaptativo.

seus respectivos BERs requeridos [16]. Para uma atribuição mais eficiente de FEC, é necessário um tipo de FEC para cada caminho óptico de acordo a atual OSNR. Isto atribuiria FEC tipo 3 a *lightpath* $(0) \Rightarrow 1 \Rightarrow 2 \Rightarrow 3 \Rightarrow (5)$, enquanto FEC tipo 2 seria suficiente para *lightpath* $(0) \Rightarrow 7 \Rightarrow 6 \Rightarrow (8)$ e FEC tipo 3 para *lightpaths* $(0) \Rightarrow (8)$. Pode-se, agora, estimar os custos totais de FEC requeridos pelas estratégias de atribuição FEC adaptativas e fixas. No exemplo da Fig.28, se a estratégia de alocação FEC fixa tradicional for aplicada a todos os percursos da rede, o FEC tipo 3 com *overhead* igual a 21,2% seria o ideal a ser empregado. O *overhead* total necessário para todos os três caminhos ópticos seria $21,2\% + 21,2\% + 21,2\% = 63,6\%$. Em contraste, se a estratégia do FEC adaptativo for aplicada, os custos gerais requeridos pelos três tipos de FEC são 6,69%, 13,34% e 21,2%, respectivamente. Isto implica que apenas um total de $6,69\% + 13,34\% + 21,2\% = 41,23\%$ de cabeçalhos seriam necessários, poupando assim 22,37% em comparação com a abordagem fixa. Assim, demonstra-se como a estratégia de alocação de FEC adaptativa é eficaz na redução do percentual de cabeçalho utilizado.

Suponha-se que um pedido de conexão deve ser estabelecida entre os nós (13) e (7) na rede americana. Executando o algoritmo de Yen para $K = 3$, os três menores caminhos selecionado são: $(13) \Rightarrow 12 \Rightarrow 9 \Rightarrow (7)$, $(13) \Rightarrow 10 \Rightarrow 9 \Rightarrow (7)$ e $(13) \Rightarrow 10 \Rightarrow 8 \Rightarrow (7)$. O comprimento para cada um destes caminhos ópticos é 1450 km, 1475 km e 1500 km respectivamente. Os respectivos OSNR são 11,04 dB, 11,27 dB e 11,51 dB sendo obviamente o menor caminho possuir menor OSNR. Os FEC3, FEC2 e FEC1 serão alocados, respectivamente a estes caminhos. Sendo que o número de *slots* para os três caminhos é $N_s = 3$. Tendo os três caminhos ópticos o mesmo número de *slots*, seria adequado alocar o tipo de FEC que possui menor percentual de cabeçalho. Assim seria alocado o FEC tipo 1 cujo cabeçalho é 6,69%. Se for utilizado considerado a proposta de Shen *et al.* o cabeçalho total para os três caminhos será $6,69\% + 13,34\% + 21,20\% = 41,23$. No entanto, considerando a nova proposta o cabeçalho total será $6,69\% + 6,69\% + 6,69\% = 20,07\%$. Percebe-se que apenas a metade do cabeçalho será gasto nesta nova proposta em comparação à proposta anterior. Isso não significa que o FEC tipo 1 será alocado nas demandas. A ideia básica é a seguinte: após calculo de número de *slots* para

diferentes K_j caminhos ópticos escolhidos, investiga-se aqueles que possuem mesmo número de *slots*. Quando encontrado, aloca-se então o tipo de FEC adequado com menor porcentagem de cabeçalho. Quando os caminhos ópticos não tiverem mesmo número de slot, a alocação é feita de forma normal conforme Shen *et al.* A vantagem de alocar o tipo de FEC com menor cabeçalho é diminuir a porcentagem de cabeçalho utilizado na rede o que conseqüentemente terá impacto no gasto de energia no processo de codificação e decodificação. A outra vantagem é a economia no uso da largura de banda na rede óptica elástica. A largura de banda e o consumo de energia dos três caminhos são 28,16 GHz, 26,46 GHz e 24,87 GHz, respectivamente, e o consumo de energia é de 0,44J/bit, 0,39J/bit e 0,32J/bit respectivamente. Percebe-se uma economia no uso da largura de banda e do consumo de energia. As análises feitas com várias baterias de testes conduziram a implementar um novo algoritmo que permita alocar de forma eficiente o tipo de FEC em um caminho óptico selecionado, reduzir o consumo de energia e melhorando o uso da largura de banda.

Como na seção anterior onde foi introduzido o algoritmo AM-RSA, a política de alocação do tipo de código FEC adotado no algoritmo AFEC-RSA é feita de forma adaptativa. A estratégia de operação é dividida em dois estágios:

- **Estágio 1:** Determinar o caminho óptico adequado que satisfaz os critérios de qualidade de transmissão e resolva os problemas de limitações na camada física da rede.
- **Estágio 2:** Alocação do ótimo FEC de forma adaptativa de acordo ao caminho óptico escolhido.

No primeiro estágio, K_j caminhos mais curtos são escolhidos por meio do algoritmo de Yen. Destes K_j escolhidos, investiga-se aqueles que cumprem as condições mencionadas do estágio 1 ou seja $\frac{d_j}{\Psi} \leq \delta$. Como determinado na seção anterior, os valores de Ψ e δ são 402,15 e 7 respectivamente. Caso que um K_j não cumpra os critérios estabelecidos ele é bloqueado. O caminho K_j é escolhido se e somente se $\frac{d_j}{\Psi} \leq \delta$. Os outros K_{j-1} que tal vez não fossem bloqueados são ordenados de forma crescente em termo de saltos e em seguida escolhe-se aquele que possui o menor número de saltos. No segundo estágio, dado um K_j , calcula-se a OSNR e o número de *slot* de frequência. Em seguida, compara-se este valor encontrado de OSNR com as $OSNR_{limit}$ de cada geração de FEC. Calcula-se adicionalmente o número de slot para cada K_j e investiga-se se alguns caminhos possuem mesmo números de *slot*. Caso afirmativo, aloca-se primeiramente o FEC com menor cabeçalho ao caminho com menor distância física e assim consecutivamente. Caso nenhum tipo de FEC for encontrado este caminho é bloqueado. Um pedido de conexão N_i é bloqueado se todos os K_j ($K_j = K_1, K_2 \dots, K_{max}$) forem bloqueados. Em caso contrário, se pelo menos um K_j for atendido o pedido de conexão K_j é aceito. Nesta tese, K_{max} é igual a 7 o que significa para cada N_i , 7 menores caminhos são escolhidos. Finalmente, o consumo de energia E_{K_j} é calculado através Eq. (3.9). O algoritmo AFEC-RSA também compara

$E_{k,j}$ a $E_{k,j-1}$ (consumo de energia da solicitação de conexão anterior a E_k) para escolher o menor consumo de energia dentro os K_j .

Nas redes ópticas tradicionais, o atendimento para cada pedido de conexão é projetado para o pior caso onde o código FEC tipo 1 é sempre usado em todas as circunstâncias. Isso traz como consequências: o uso ineficiente da largura de banda e da eficiência espectral além de gerar um alto nível de bloqueio. Baseado nesta estratégia o algoritmo AFEC-RSA foi implementado, cujo pseudocódigo é ilustrado a seguir:

O desempenho do algoritmo AFEC-RSA é comparado com os algoritmos tradicionais SP-RSA e MH-RSA os quais são resumidos a seguir:

- **SP**: o tipo de FEC empregado é fixo para todas as solicitações de conexão recebidas e usa o algoritmo Dijkstra para selecionar o caminho mais curto. Finalmente, o consumo de energia para o caminho mais curto é calculado.
- **MH**: seleciona o *lightpath* com saltos mínimos e adota um FEC fixo para todos os pedidos de conexão recebidos; Finalmente, o consumo de energia do caminho óptico selecionado é calculado.
- **AFEC-RSA**: executa o algoritmo de Yen [68] para selecionar k -caminho mais curto. Depois disso, aloca o tipo de FEC ideal para cada k caminho mais curto selecionado. Finalmente, seleciona-se o caminho óptico k que tem o menor consumo de energia. O valor de K não é fixo, ao contrário, muda de uma conexão a outra com o fim de otimizar o gasto de energia. Para cada pedido de conexão, o algoritmo avalia e calcula o gasto de energia para cada K e comparando com $K-1$.

Os fluxogramas dos algoritmo LFEC (para alocação do melhor tipo de FEC) e AFEC-RSA (para escolha do melhor caminho e calculo do consumo de energia) são ilustrados nas páginas seguintes. Nos dois fluxogramas, F_i é o tipo de FEC correspondente ao caminho óptico i , F_m é o tipo de FEC escolhido enquanto F_o é ótimo FEC que satisfaz os requisitos. N_{si} é o número de slot para o caminho i , Bw_i é a largura de banda correspondente com $OSNR_i$ sendo a relação sinal ruído óptico correspondente ao pedido i .

O desempenho da técnica de AFEC-RSA é avaliado e apresentado nas Fig.31 e 32. Neste caso, considera-se que não há bloqueio de conexão. Ou seja, todos os pedidos de conexão que chegam na rede óptica elástica são atendidos. Isso quer dizer que quando a OSNR de um caminho óptico for menor do que $OSNR_{limit}$ o FEC de tipo 3 (LDPC) será o considerado. A Fig.31 representa o consumo de energia versus pedidos de conexão. Os resultados das simulações ressaltam que o consumo de energia aumenta proporcionalmente com o número de pedido de conexão. Além disso, o AFEC-RSA apresenta o menor consumo de energia em comparação com os outros algoritmos. Isto é devido ao fato de que o algoritmo AFEC-RSA seleciona o

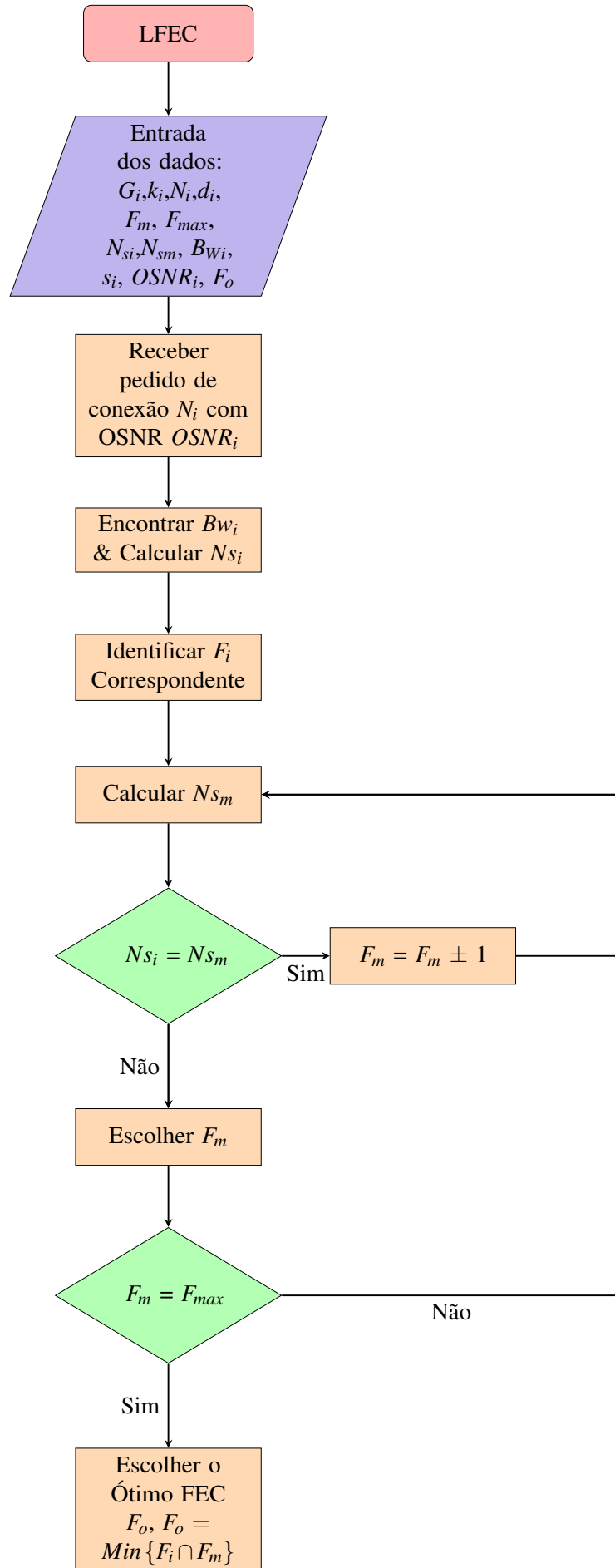


Figura 29 – Algoritmo LFEC para escolha do melhor tipo de FEC.

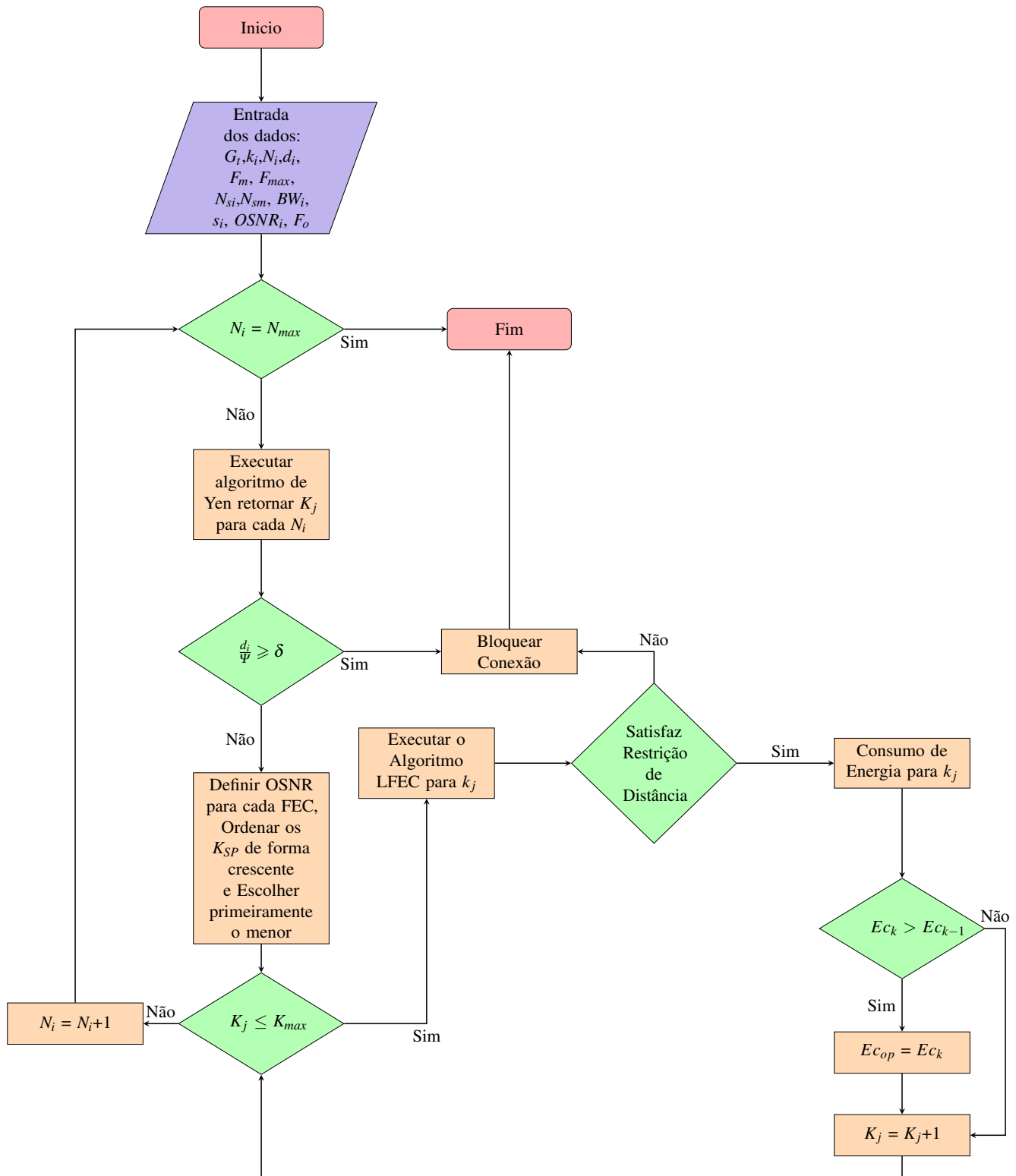


Figura 30 – Algoritmo AFEC-RSA para melhorar o desempenho da rede óptica elástica.

"melhor" formato de FEC adaptativamente para a solicitação de conexão de acordo com a OSNR do caminho óptico. Além disso, o algoritmo adapta o valor, k , de acordo com as solicitações de conexões.

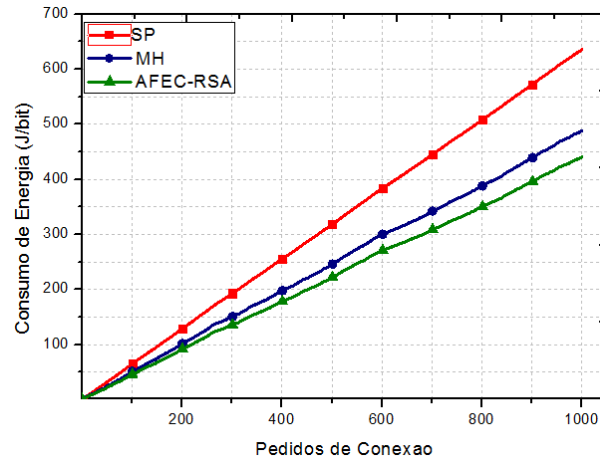


Figura 31 – Consumo de energia em função da carga da rede.

O impacto da capacidade de correção de erro sobre cada um dos algoritmos mencionados acima é avaliado. Na Fig.32 apresenta-se a capacidade do código FEC para $t = 10, 50, 100$ respectivamente. O consumo de energia aumenta à medida que cresce a capacidade de correção do código FEC. Além disso, pode-se perceber que o algoritmo AFEC-RSA supera os outros algoritmos. O aumento da capacidade de correção de erro do código permite que mais *bit* com erro possam ser corrigidos. Isso acontece pelo aumento do cabeçalho uma vez que os *bits* de informação são enviadas com *bits* de redundância nos códigos FEC. Quanto mais *bits* a serem corrigidos mais energia será gasto.

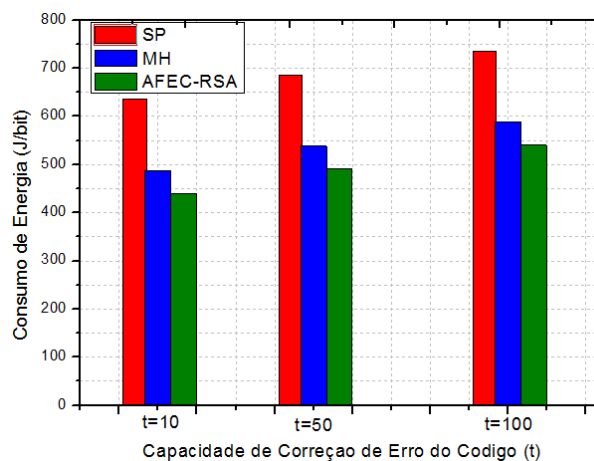


Figura 32 – Consumo de energia em função da capacidade de correção de erro t .

Fig.33 mostra que a eficiência energética da EON diminui com o crescimento da carga de rede para todos os três algoritmos. No entanto, o AFEC-RSA supera tanto o MH quanto o Algoritmos SP. Isso porque o AFEC-RSA é capaz de adotar a flexibilidade dada pelas diferentes

taxas de transmissão e adequar cada tipo de FEC segundo a OSNR o que permite um melhor ajustamento da taxa de transmissão para a capacidade real solicitada.

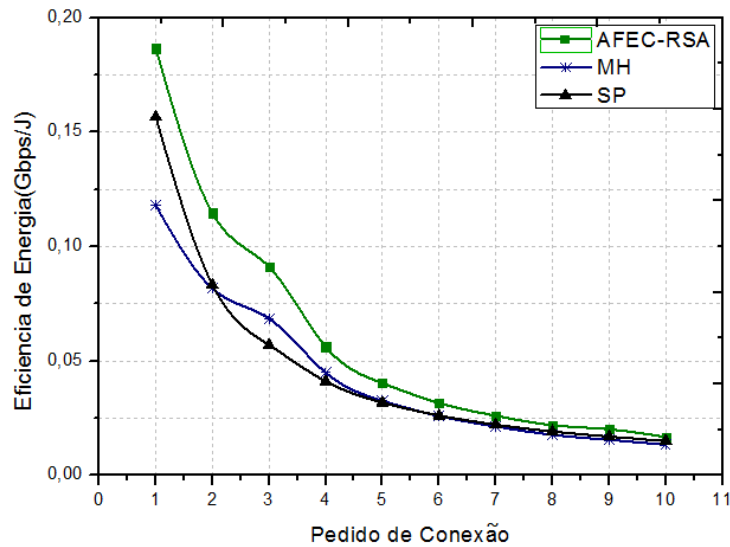


Figura 33 – Eficiência de energia em função do pedido de conexão para os algoritmos SP, MH e AFEC-RSA.

Fig.34 mostra a probabilidade de bloqueio em função de solicitações de conexão. Mais uma vez, o algoritmo AFEC-RSA proposto superou os algoritmos SP e MH. Dentro prazo de porcentagem, a probabilidade de bloquear uma conexão solicitação quando o algoritmo AFEC-RSA é usado é menor que 1% aproximadamente. Isto pode ser explicado pelo fato de que o algoritmo proposto não só considera o tipo FEC adaptativo, no entanto, usa taxa de transmissão variável.

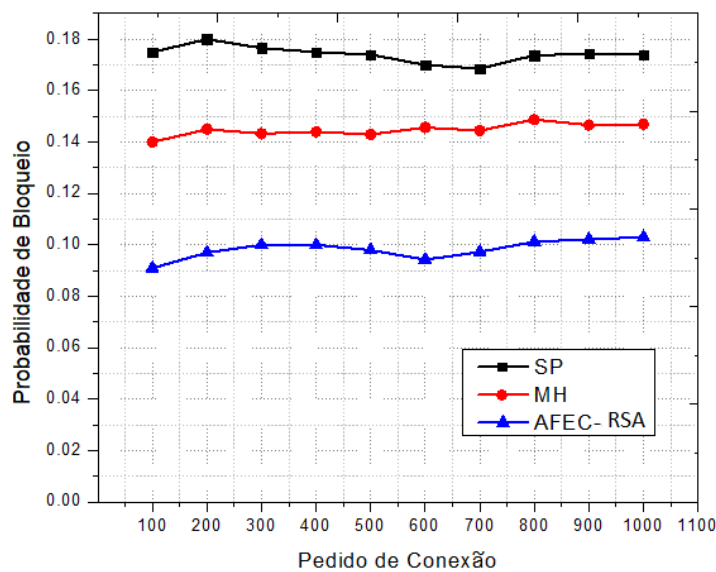


Figura 34 – Probabilidade de bloqueio em função do pedido de conexão para os algoritmos AFEC-RSA, MH e SP.

4.4 Técnica Híbrida em Redes Ópticas Elásticas

Os resultados apresentados nas últimas duas seções demonstram que o desempenho da rede óptica elástica é melhorado quando as técnicas de modulação adaptativa e FEC adaptativo são utilizados separadamente. Uma técnica híbrida pode resultar em um melhor desempenho em diversos cenários. Portanto, além das duas análises descritas nas seções anteriores, propõe-se, ainda, nesta tese o desenvolvimento de uma técnica híbrida (chamado de *Adaptive Modulation and Code - Routing Spectrum Assignment* AMC-RSA) que é a combinação entre as técnicas AM-RSA e AFEC-RSA trabalhando simultaneamente.

A ideia principal de operação da técnica híbrida é a seguinte: quando um pedido de conexão chega à rede óptica elástica, o algoritmo irá buscar em primeira instância o tipo de código FEC a ser empregado de acordo à OSNR. Em seguida, o AMC-RSA busca adotar o tipo de modulação apropriada segundo a distância óptica e a OSNR. Finalmente, o consumo de energia é calculado para os k caminhos mais curtos. AMC-RSA compara o gasto de energia dos K (uso do algoritmo de Yen [68]) caminhos mais curtos e menos saltos e escolhe aquele que apresenta menor consumo de energia. O critério de bloqueio é definido quando nenhum código FEC for escolhido, ou nenhuma modulação ou quando o caminho óptico não cumpre os requisitos da qualidade de serviço ou qualidade de transmissão. O pseudocódigo da técnica híbrida é apresentado na Fig.35.

O desempenho da técnica AMC-RSA pode ser mensurado em término de consumo de energia, eficiência de energia e probabilidade de bloqueio como nos casos anteriores. A Fig.36 mostra o consumo de energia por *bit* de informação versus comprimento do caminho óptico para os três diferentes algoritmos. Os resultados destacam que o consumo de energia aumenta com o crescimento do comprimento do caminho óptico para todos os três algoritmos. Além disso, o AMC-RSA apresenta o menor consumo de energia após o algoritmo MH e, por fim, o algoritmo SP. A principal razão é que o algoritmo AMC-RSA seleciona o melhor formato de modulação e o tipo FEC de forma adaptativa para a solicitação de conexão de acordo com a distância física do caminho percorrido para usar menos esquemas de modulação com eficiência de espectro e menor *overhead* de código FEC. Da teoria da transmissão digital, esquemas de modulação menos eficientes no espectro (Ex.: BPSK, QPSK) podem funcionar com uma relação sinal-ruído (SNR) baixa para uma dada taxa de erro de *bit* (BER). Além disso, ao inserir *bits* de paridade extras ao custo de menor rendimento efetivo, aumentará a capacidade do FEC de corrigir erros e, assim, fornecerá o chamado ganho de codificação correspondente ao aumento do SNR. Portanto, menos regeneração, amplificação e processamento de sinal serão necessários. Como consequência, a eletrônica digital funciona na menor taxa, assim, o consumo de energia é economizado. Finalmente, o AMC-RSA explora a flexibilidade dada por diferentes taxas de transmissão, o que permite um melhor ajuste da taxa de transmissão à capacidade real solicitada.

A Fig.37 ilustra a probabilidade de bloqueio em função de número de conexões para

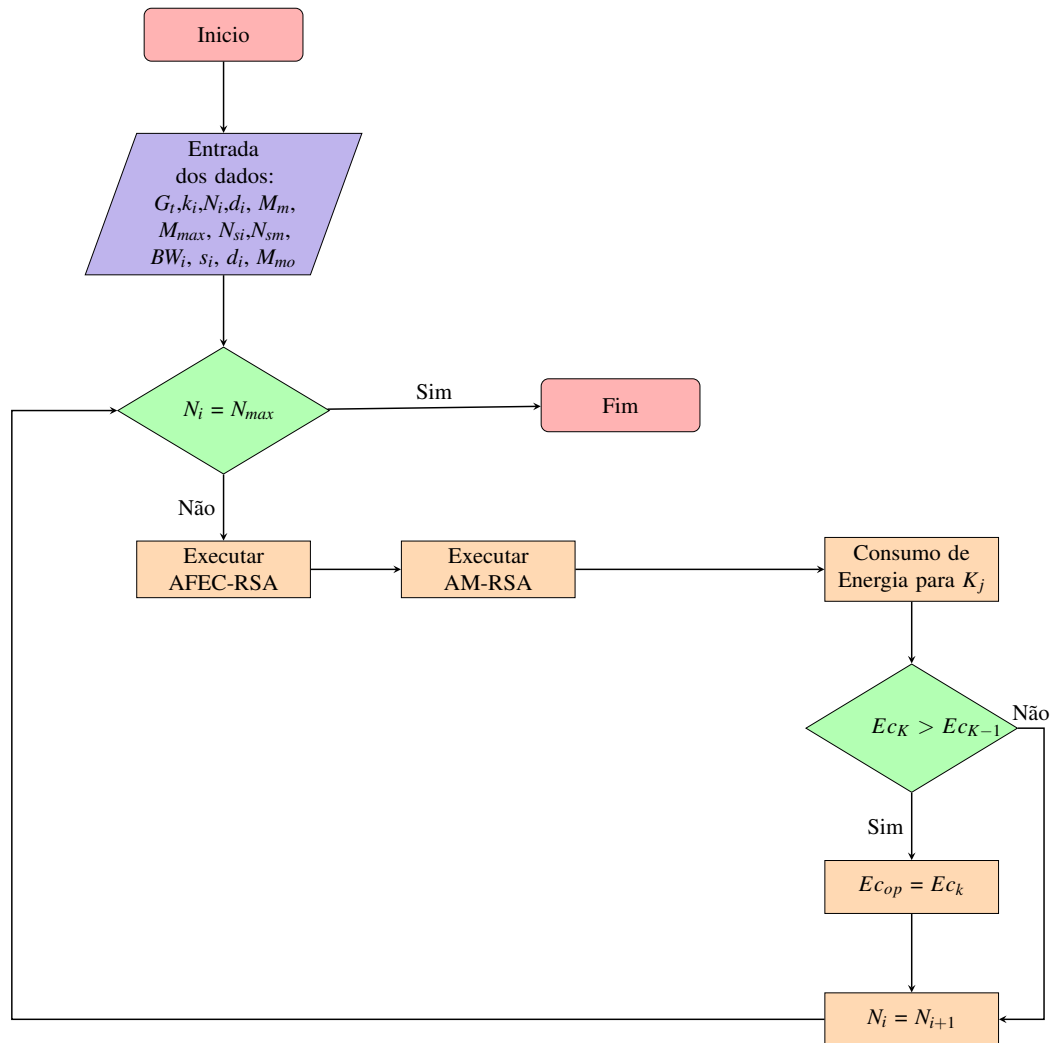


Figura 35 – Algoritmo AMC-RSA para melhorar o desempenho da rede óptica elástica.

os algoritmos AMC-RSA, SP e MH. Mais uma vez, o algoritmo AMC-RSA supera os outros algoritmos SP e MH. O algoritmo AMC-RSA explora uma função de transpondedor variáveis de largura de banda (BVTs) que pode ajustar sua taxa de *bits* e largura de banda de forma dinâmica com um *trade-off* entre alcance e capacidade. Ainda, neste trabalho, a taxa de *bits* não é uma constante senão ela varia de acordo ao caminho óptico. Isto permite adequar o formato de modulação e código FEC permitindo a redução de bloqueio de conexão. Além disso, o pedido de conexão é bloqueado se, e somente se, todos os K_j trajetos mais curtos selecionados forem bloqueados em contraste com o algoritmo SP e MH, somente um caminho óptico é selecionado.

Observa-se que a técnica AMC-RSA apresenta menor probabilidade de bloqueio seguido da AM-RSA e finalmente AFEC-RSA. Para uma carga de rede óptica elástica variando entre 100 a 1000 pedidos de conexão, o algoritmo AMC-RSA apresenta em média 12,45% de bloqueio, enquanto os algoritmos AM-RSA e AFEC-RSA apresentam 38,01% e 61,34% de bloqueio respectivamente.

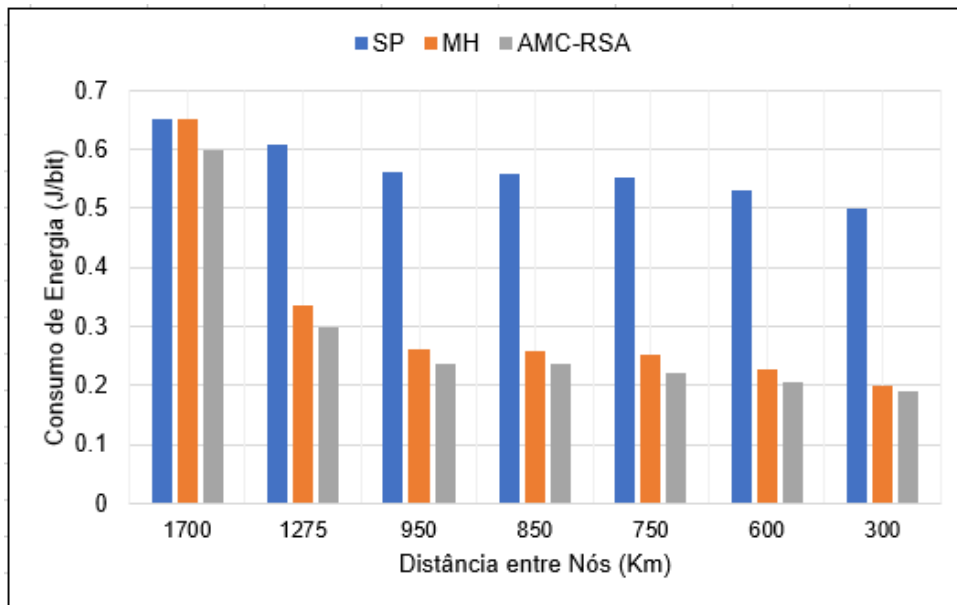


Figura 36 – Consumo de energia por *bit* de informação versus comprimento do percurso para os três diferentes algoritmos AMC-RSA, SP e MH.

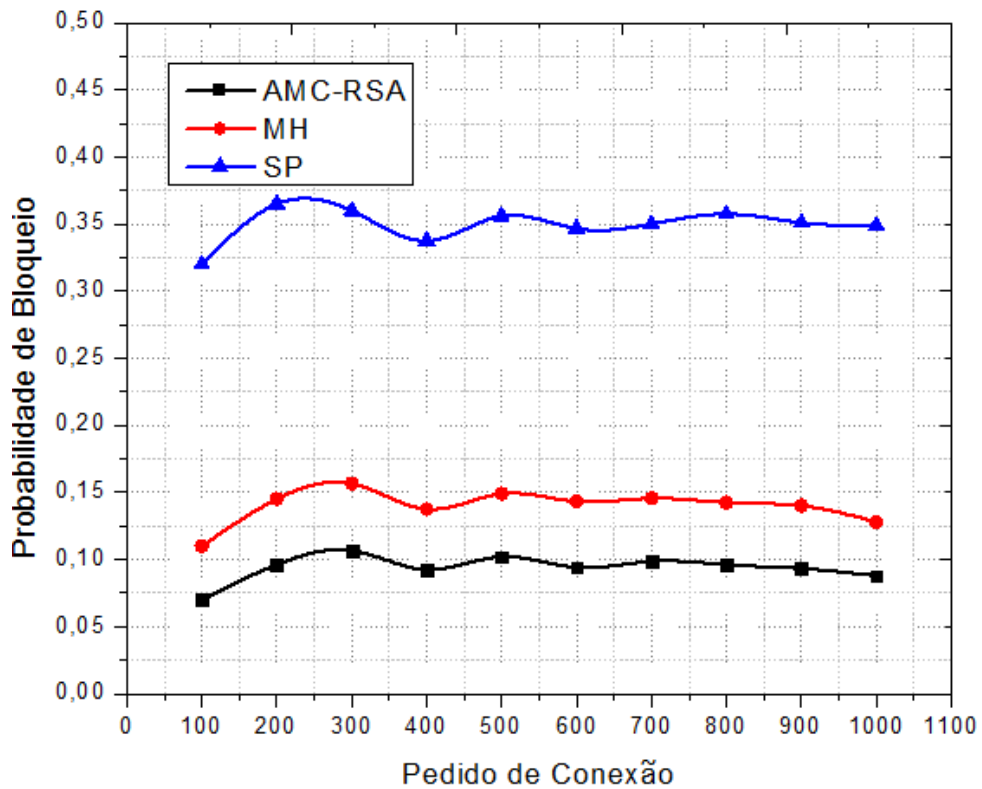


Figura 37 – Probabilidade de bloqueio para os algoritmos AMC-RSA, SP e MH.

Conclusão

O presente trabalho de tese apresentou novas estratégias visando a redução de gasto energético e melhoramento da eficiência de energia em redes ópticas elásticas. Foram desenvolvidos cinco diferentes algoritmos baseados na adaptação dos parâmetros de modulação e codificação para atingir os objetivos propostos. A estratégia de adaptação busca satisfazer os requisitos da qualidade de serviço e qualidade de transmissão. Além disso, a largura de banda varia de acordo com o comprimento do caminho óptico o que difere das técnicas tradicionais onde a largura de banda é mantida fixa. O desempenho dos algoritmos propostos foram comparados com aqueles existentes na literatura os quais são: *SP* (apenas o menor caminho óptico é escolhido), *MH* (menor caminho óptico e que contem menor número de salto), *mAdap*(modulação adaptativa com política de alocação *first fit*). Nesta tese foram introduzidas novas técnicas de alocação do formato modulação e do tipo de código FEC o que conduz a melhorar o desempenho da rede óptica elástica. Na estratégia de modulação adaptativa (AM-RSA), o formato de modulação é alterado de acordo à distância do caminho óptico e a largura de banda requerida. A análise de desempenho das técnicas propostas baseiam-se nos critérios tais como consumo de energia, eficiência de energia e probabilidade de bloqueio. Os resultados analíticos da estratégia AM-RSA foram comparados com os algoritmos *SP*, *MH* e *mAdap* respectivamente.

Foi demonstrado que o consumo de energia aumenta proporcionalmente com o formato de modulação. Ou seja, a modulação com maior número de símbolos apresenta menor consumo de energia. Em todos os critérios de comparação foi observado que o desempenho da rede óptica elástica é melhorada quando a técnica AM-RSA é empregada. A comparação analítica demonstrou que a eficiência energética é melhorada até 27 %, enquanto o uso de largura de banda disponível é reduzido até 60 % em alguns casos e, finalmente, a probabilidade de bloqueio é reduzida para 30 %. A segunda estratégia (AFEC-RSA) adota a codificação adaptativa na qual o tipo de código FEC a ser empregado varia em função da relação sinal ruído óptico, a largura de banda requerida e a distância física entre os nós. Igual que no caso anterior, o desempenho da segunda técnica proposta foi comparado com as técnicas *SP* e *MH*. Em todos os critérios de comparação considerados (Consumo de energia, Eficiência de energia e taxa de bloqueio) tem-se percebido um melhoramento do desempenho da rede em todos os casos de comparação. Em termo de consumo de energia, foi possível uma redução do consumo de energia até 32% e 26% se comparada com as técnicas tradicionais *SP* e *MH* respectivamente.

Finalmente, uma técnica híbrida (AMC-RSA) que é a combinação entre as técnicas AM-RSA e AFEC-RSA trabalhando simultaneamente foi desenvolvida. Nisto foi considerado que além da modulação do sinal, há emprego de código corretor de erro com o intuito de corrigir possível erro ocorrido durante a transmissão. Ambos são utilizados de forma adaptativa no sistema sendo diferente da literatura onde estes parâmetros são fixos. Com a operação simultânea

de AM-RSA e FEC adaptativo foi possível uma redução do consumo de energia da rede até 28% em comparação às técnicas convencionais. Uma observação notória é que o consumo de energia cresce com o aumento da capacidade de correção de erro. Obviamente quanto mais *bits* devem ser corrigidos maior deve ser o tamanho do cabeçalho do código (sendo usado o código FEC) mais energia gasta.

A técnica de comutação poderá ser abordada como trabalho futuro. Nesta estratégia, o tipo de modulação e ou codificação no canal óptico é comutado de forma dinâmica de acordo a um limitante pré-fixado com o intuito de manter a eficiência da rede em seu ótimo nível de desempenho. A continuação desta tese será desenvolvida como projeto de pesquisa de pós doutorado em parceria com os pesquisadores da Universidade de Pernambuco (UPE). O objetivo será de implementar uma metodologia de projeto de camada física para redes ópticas elásticas usando algoritmos de otimização de muitos objetivos (*Many-Objective Optimization* - MaOP), com a finalidade de criar redes resilientes, eficientes, de baixo consumo e que apresentem bom desempenho. Apesar dos resultados satisfatórios atingidos nesta tese é importante ressaltar diversas dificuldade encontradas ao longo do trabalho. A mais difícil foi a falta de um simulador adequado que permita validar os resultados obtidos. Em parceria com os pesquisadores da Universidade Tecnológica de Havana (UTH - Cuba), um simulador está sendo desenvolvido para redes ópticas elásticas capaz de mensurar o desempenho deste tipo de redes em termo de consumo de energia, taxa de bloqueio, despesas de capital etc. A flexibilidade do simulador permitiria ainda aos futuros pesquisadores criar próprias topologias de redes e a inserção de novos algoritmos para comparar com os presentes na literatura.

Referências

- [1] George Koutitas and Panagiotis Demestichas. A review of energy efficiency in telecommunication networks. *Telfor journal*, 2(1):2–7, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 1, 8 e 9.
- [2] 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 2 vezes nas páginas 1 e 8.
- [3] Esther Le Rouzic. Network evolution and the impact in core networks. In *Optical Communication (ECOC), 2010 36th European Conference and Exhibition on*, pages 1–8. IEEE, 2010. Citado na página 1.
- [4] Mario Pickavet and Rod Tucker. Network solutions to reduce the energy footprint of ict. In *European conference on optical communications (ECOC 2008), Brussels, Belgium*, pages 21–25, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 8.
- [5] Tim Kelly and Standardization Head. Icts and climate change. *ITU-T Technology, Tech. Rep*, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 8.
- [6] 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 na página 1.
- [7] Rodney S Tucker. Green optical communications—part i: Energy limitations in transport. *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, 17(2):245–260, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 1, 32 e 33.
- [8] 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 6 vezes nas páginas 1, 2, 8, 9, 10 e 11.
- [9] 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 1, 2 e 37.
- [10] Masahiko Jinno, 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 3 vezes nas páginas 2, 9 e 10.
- [11] Rajiv Ramaswami, Kumar Sivarajan, and Galen Sasaki. *Optical networks: a practical perspective*. Morgan Kaufmann, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 9.
- [12] 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 2.
- [13] Mirosław Klinkowski and Krzysztof Walkowiak. Routing and spectrum assignment in spectrum sliced elastic optical path network. *IEEE Communications Letters*, 15(8):884–886, 2011. Citado na página 2.
- [14] 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 2 e 27.
- [15] Helder A Pereira, Daniel AR Chaves, Carmelo JA Bastos-Filho, and Joaquim F Martins-Filho. Osnr model to consider physical layer impairments in transparent optical networks. *Photonic Network Communications*, 18(2):137–149, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 34.
- [16] Hong Guo, Hua Dai, Chao Wang, Yongcheng Li, Sanjay K Bose, and Gangxiang Shen. Benefit of adaptive fec in shared backup path protected elastic optical network. *Optics express*, 23(15):20158–20175, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 2, 3, 40 e 53.
- [17] Xin Wan, Nan Hua, and Xiaoping Zheng. Dynamic routing and spectrum assignment in spectrum-flexible transparent optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 4(8):603–613, 2012. Citado 8 vezes nas páginas 2, 3, 10, 38, 39, 40, 43 e 50.
- [18] Mohsen Yaghubi-Namaad, Akbar Ghaffarpour Rahbar, and Behrooz Alizadeh. Adaptive modulation and flexible resource allocation in space-division-multiplexed elastic optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, 10(3):240–251, 2018. Nenhuma citação no texto.
- [19] Shohei Fujii, Yusuke Hirota, Hideki Tode, and Koso Murakami. On-demand spectrum and core allocation for reducing crosstalk in multicore fibers in elastic optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, 6(12):1059–1071, 2014. Citado na página 3.

- [20] Yongcheng Li, Hua Dai, Gangxiang Shen, and Sanjay K Bose. Adaptive fec-based lightpath routing and wavelength assignment in wdm optical networks. *Optical Switching and Networking*, 14:241–249, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 29.
- [21] Christoph Lange, Dirk Kosiankowski, Rainer Weidmann, and Andreas Gladisch. Energy consumption of telecommunication networks and related improvement options. *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, 17(2):285–295, 2011. Citado na página 8.
- [22] 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 10.
- [23] 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 10.
- [24] J Faezah and K Sabira. Adaptive modulation for ofdm systems. *International journal of communication networks and information security*, 1(2):1, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 18.
- [25] 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 10 e 18.
- [26] 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 10 e 11.
- [27] Junyan Liu and Wanyi Gu. Spectrum consecutiveness based routing and spectrum allocation in flexible bandwidth networks. *Chinese Optics Letters*, 2012. Citado na página 12.
- [28] Alberto Castro, Luis Velasco, Marc Ruiz, Mirosław Klinkowski, Juan Pedro Fernández-Palacios, and Davide Careglio. Dynamic routing and spectrum (re) allocation in future flexgrid optical networks. *Computer Networks*, 56(12):2869–2883, 2012. Citado na página 12.
- [29] Bijoy Chand Chatterjee, Nityananda Sarma, and Eiji Oki. Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(3):1776–1800, 2015. Citado na página 12.
- [30] Suresh Subramaniam and Richard A Barry. Wavelength assignment in fixed routing wdm networks. In *Communications, 1997. ICC'97 Montreal, Towards the Knowledge*

- Millennium. 1997 IEEE International Conference on*, volume 1, pages 406–410. IEEE, 1997. Citado na página 13.
- [31] Ramu Ramamurthy and Biswanath Mukherjee. Fixed-alternate routing and wavelength conversion in wavelength-routed optical networks. *IEEE/ACM Transactions on networking*, 10(3):351–367, 2002. Citado na página 14.
- [32] Kit-man Chan and Tak-shing Peter Yum. Analysis of least congested path routing in wdm lightwave networks. In *INFOCOM'94. Networking for Global Communications., 13th Proceedings IEEE*, pages 962–969. IEEE, 1994. Citado na página 14.
- [33] Jason P Jue and Gaoxi Xiao. An adaptive routing algorithm for wavelength-routed optical networks with a distributed control scheme. In *Computer Communications and Networks, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on*, pages 192–197. IEEE, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.
- [34] Luis Delvalle, Ester Alfonzo, and Diego P Pinto Roa. Eons: An online rsa simulator for elastic optical networks. In *Computer Science Society (SCCC), 2016 35th International Conference of the Chilean*, pages 1–12. IEEE, 2016. Citado na página 14.
- [35] Mirosław Klinkowski, Marc Ruiz, Luis Velasco, Davide Careglio, Victor Lopez, and Jaume Comellas. Elastic spectrum allocation for time-varying traffic in flexgrid optical networks. *IEEE journal on selected areas in communications*, 31(1):26–38, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- [36] Adrian Asensio Garcia. Elastic spectrum allocation in flexgrid optical networks. *Univ. Politècnica Catalunya, Catalunya, Spain, Tech. Rep*, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- [37] Adriana Rosa, Cicek Cavdar, Solon Carvalho, João Costa, and Lena Wosinska. Spectrum allocation policy modeling for elastic optical networks. In *High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET), 2012 9th International Conference on*, pages 242–246. IEEE, 2012. Citado na página 15.
- [38] Waya Fadini and Eiji Oki. A subcarrier-slot partition scheme for wavelength assignment in elastic optical networks. In *High Performance Switching and Routing (HPSR), 2014 IEEE 15th International Conference on*, pages 7–12. IEEE, 2014. Nenhuma citação no texto.
- [39] Ke Wen, Yawei Yin, David J Geisler, Shuo Chang, and SJ Ben Yoo. Dynamic on-demand lightpath provisioning using spectral defragmentation in flexible bandwidth networks. In *European Conference and Exposition on Optical Communications*, pages Mo–2. Optical Society of America, 2011. Citado na página 15.

- [40] Taesang Yoo, Richard J Lavery, Andrea Goldsmith, and David J Goodman. Throughput optimization using adaptive techniques. *IEEE Communication Letters*, 2006. Citado na página 18.
- [41] Kannarao Shatarasi and Srinivasa Rao Reddi. Throughput and error state performance of amc scheme in 3g wireless systems. *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)*, 14(3):89, 2014. Nenhuma citação no texto.
- [42] Sami HO Salih and Mamoun MA Suliman. Implementation of adaptive modulation and coding technique using. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2(5), 2011. Citado na página 18.
- [43] Jose Marcos C Brito and IS Bonatti. Threshold levels for adaptive modulation with channel coding in the wireless atm networks. In *High Speed Networks and Multimedia Communications 5th IEEE International Conference on*, pages 187–191. IEEE, 2002. Nenhuma citação no texto.
- [44] Moise SY Bandiri and José Marcos C Brito. Analyzing the optimum switching points for adaptive modulation in wireless networks with rayleigh fading. *threshold (computed based on a fixed BER target)*, 6:10, 2014. Nenhuma citação no texto.
- [45] 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. Nenhuma citação no texto.
- [46] Sabi YM Bandiri, Rafael Braga, and Danilo H Spadoti. Analytical comparison of the performance of adaptive modulation and coding in wireless network under rayleigh fading. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 16(3):723–735, 2017. Citado na página 20.
- [47] Sabi YM Bandiri, Rafael MS Braga, Tales C Pimenta, and Danilo H Spadoti. Energy consumption improvement based on distance adaptive modulation in elastic optical network. In *Devices, Circuits and Systems (ICDCS), 2017 International Caribbean Conference on*, pages 29–32. IEEE, 2017. Nenhuma citação no texto.
- [48] Sabi Yari Moïse Bandiri et al. Análise de desempenho de técnicas de modulação adaptativa, fec adaptativo e técnicas híbridas em canais com desvanecimento rayleigh. 2015. Citado na página 18.
- [49] John G Proakis. *Compenders*. Wiley Online Library, 2001. Citado na página 19.
- [50] Ivan B Djordjevic and Bane Vasic. Nonbinary ldpc codes for optical communication systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, 17(10):2224–2226, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

- [51] AS Omar. Fec techniques in submarine transmission systems. In *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2001. OFC 2001*, volume 2, pages TuF1–TuF1. IEEE, 2001. Citado na página 22.
- [52] O Ait Sab and Vincent Lemaire. Block turbo code performances for long-haul dwdm optical transmission systems. In *Optical Fiber Communication Conference, 2000*, volume 3, pages 280–282. IEEE, 2000. Citado na página 22.
- [53] 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 21.
- [54] William Ryan and Shu Lin. *Channel codes: classical and modern*. Cambridge University Press, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- [55] Moise SY Bandiri and José Marcos C Brito. Analyzing the optimum switching points for adaptive fec in wireless networks with rayleigh fading. *ICN 2015*, page 35, 2015. Nenhuma citação no texto.
- [56] SYM Bandiri, FRR Marante, Tales Cleber Pimenta, and Danilo H Spadoti. Energy consumption improvement based on adaptive fec code in elastic optical network. In *2018 IEEE 9th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS)*, pages 1–4. IEEE, 2018. Citado na página 20.
- [57] 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 na página 20.
- [58] Frank Chang, Kiyoshi Onohara, and Takashi Mizuochi. Forward error correction for 100 g transport networks. *IEEE Communications Magazine*, 48(3), 2010. Citado na página 22.
- [59] 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 2 vezes nas páginas 22 e 35.
- [60] 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 22.
- [61] Fábio Durand and Taufik Abrão. Energy efficiency analysis in adaptive fec-based lightpath elastic optical networks. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 24(09):1550133, 2015. Citado 5 vezes nas páginas 25, 26, 29, 34 e 37.

- [62] 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 3 vezes nas páginas 31, 32 e 33.
- [63] 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 na página 32.
- [64] Robert H Walden. Analog-to-digital converter survey and analysis. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 17(4):539–550, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- [65] Daniel JF Barros and Joseph M Kahn. Comparison of orthogonal frequency-division multiplexing and on-off keying in amplified direct-detection single-mode fiber systems. *Journal of lightwave technology*, 28(12):1811–1820, 2010. Citado na página 34.
- [66] Partha P Mitra and Jason B Stark. Nonlinear limits to the information capacity of optical fiber communications. *arXiv preprint physics/0011016*, 2000. Citado na página 35.
- [67] Gabriella Bosco, Pierluigi Poggiolini, Andrea Carena, Vittorio Curri, and Fabrizio Forghieri. Analytical results on channel capacity in uncompensated optical links with coherent detection. *Optics express*, 19(26):B440–B451, 2011. Citado na página 35.
- [68] Jin Y Yen. Finding the k shortest loopless paths in a network. *management Science*, 17(11):712–716, 1971. Citado 3 vezes nas páginas 48, 55 e 60.

Apêndices

Algorithm 1 Algoritmo AM-RSA

Input: $G, k, N_c, \text{BlockMax}$ \triangleright G é o tipo da rede, k número de caminhos mais curtos e N Número de Conexões, BlockMax é o máximo bloqueio permitido

Output: lowerConsumption

\triangleright O menor consumo para cada Conexão

```

1: procedure SEC ALGORITHM( $G, k, N_c, \text{BlockMax}$ )
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:     for  $j \leftarrow 1, k$  do
6:       if  $\text{Cost} > d\text{Bpsk}$  then
7:          $\text{Block} \leftarrow \text{Block} + 1$ 
8:         if  $\text{BlockMax} = \text{Block}$  then
9:           break;
10:        end if
11:       else
12:         if  $d\text{qpsk} < \text{Cost} \leq d\text{Bpsk}$  then
13:            $m \leftarrow 2$ 
14:         else
15:           if  $d8\text{psk} < \text{Cost} \leq d4\text{psk}$  then
16:              $m \leftarrow 4$ 
17:           else
18:             if  $d16\text{qam} < \text{Cost} \leq d8\text{psk}$  then
19:                $m \leftarrow 8$ 
20:             else
21:               if  $d8\text{psk} < \text{Cost} \leq d16\text{qam}$  then
22:                  $m \leftarrow 16$ 
23:               else
24:                 if  $d16\text{qam} < \text{Cost} \leq d32\text{qam}$  then
25:                    $m \leftarrow 32$ 
26:                 if  $d32\text{qam} < \text{Cost} \leq d64\text{qam}$  then
27:                    $m \leftarrow 64$ 
28:                 end if
29:               end if
30:             end if
31:           end if
32:         end if
33:       end if
34:        $\text{Ec} \leftarrow \text{EnergyConsumption}(m)$ 
35:       if  $\text{Ec}_j \neq \text{Ec}_{j-1}$  then
36:         if  $\text{Ec}_j < \text{Ec}_{j-1}$  then
37:            $\text{Lowerconsumption}[i] \leftarrow \text{Ec}_j$ 
38:         end if
39:       end if
40:     end if
41:   end for
42: end for
43: end procedure

```

Algorithm 2 Algoritmo de AFEC-RSA adaptativo

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

Output: Menor Consumo de Energia ▷ O menor Consumo de Energia para cada Pedido de Conexão

```

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

```

▷ $t = (0, \dots, 100)$

Algorithm 3 Algoritmo AMC-RSA

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, BlockMax Máximo bloqueio Permitido

Output: lowerConsumption

\triangleright Menor consumo por Conexão

```

1: procedure ALGORITMO HAMC-RSA( $G, k, N_c, \text{BlockMax}, \text{OSNR}, t$ )
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:       $\text{Ec} \leftarrow \text{EnergyConsumption}(m, \text{FEC})$ 
49:      if  $\text{Ec}_j \neq \text{Ec}_{j-1}$  then
50:        if  $\text{Ec}_j < \text{Ec}_{j-1}$  then
51:           $\text{Lowerconsumption}[i] \leftarrow \text{Ec}_j$ 
52:        end if
53:      end if
54:    end if
55:  end for
56: end for
57: end procedure

```

Anexos

ANEXO A – Parâmetros do Enlace da Fibr a  tica

Variável	Valor adotado
D - Parâmetro de dispersão	16.5(ps/(nm.km))
β - Dispersão do grupo de velocidade	20.7(ps^2/km)
λ - Comprimento de onda	1550 (nm)
$\Delta\lambda$ - Espaçamento do canal	0.1(nm)
γ_N - Coeficiente de não-linearidade da fibra 1.3(1/(W.km))	
α - Coeficiente de perda da fibra	0.2(dB/km)
L_s - comprimento do <i>span</i>	80(km)
h - Constante de Planck	$6,63 \times 10^{-34}$ (J/Hz)
ν - Frequência da luz	1931(THz)
$N_{node,i}$ - Penalidade da potência do ruído BV-OXC	1dB
N_c - Números de canais	100
P_e - Probabilidade de erro de símbolo (sem código FEC)	10^{-5}

ANEXO B – Variáveis do Consumo de Energia

Variável	Valor adotado
η_{EO} - Eficiência do consumo de energia	1%
η_T - Eficiência do Transpônder	1.5(W/Gbps)
E_{op}^G - Energia de operação por porta	$0.69p_tV^2$ (fJ)
E_{op}^R - Energia de acesso por registro	$3.43p_tV^2$ (fJ)
B - Comprimento do arquivo transmitido	100 (GB)
n_c - Número de <i>frame</i>	10^7 (frames)
h_s - Tamanho do cabeçalho	64(B)
ε - Eficiência espectral	1,2,3,4,5,6 (b/s/Hz)
E_{P-S} - Conversão Paralelo/Serie	$4.0/(\varepsilon.F_S)$ (J/bit)
F_D - Figura de mérito DAC	1.56×10^{-12} (J/conv)
n_d - Resolução DAC	4,6,8 (bits)
F_S - Frequência de amostragem	$2R/\varepsilon$ (Hz)
V_{cc} - Tensão de alimentação do <i>driver</i> do modulador	5.2(V)
V_{pp} - Tensão de balanço do pico do modulador	8(V)
R_T - Resistência à terminação do modulador	50(Ohm)
L_{mod} - Excesso de perda 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
n_{ADC} - Resolução DAC	8(bits)
E_{LO} - Consumo de oscilador local	$5/(\varepsilon.F_S)$
E_{CD} - Consumo de compensação de CD	$324/(\varepsilon.F_S)$ (pJ/bit)
E_{TR} - Consumo de TR	$104/(\varepsilon.F_S)$ (pJ/bit)
E_{PMD} - Consumo de compensação do PMD	$246/(\varepsilon.F_S)$ (pJ/bit)

E_{CR} - Consumo de transportadora de recuperação	$56/(\epsilon.F_S)$ (pJ/bit)
P_{sat} - Energia de saturação do EDFA	16(dBm) $15-4 \times 10^{16}(\lambda-1555 \times 10^{-9})^2$
η_{EPCE} Eficiência de conversão do EDFA	1%
P_{LCOS} Consumo do porto BV-0XC	4(W)