



Dissertação de Mestrado

Roteamento Multicritério em Redes Ópticas Elásticas Dinâmicas

Sérgio Ricardo Lima Ribeiro

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica
Campus João Pessoa

Roteamento Multicritério em Redes Ópticas Elásticas Dinâmicas

Sérgio Ricardo Lima Ribeiro

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba como requisito necessário para obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Sinais.

Rossana Moreno Santa Cruz, D.Sc.
Orientadora

João Pessoa, Paraíba, Brasil
31 de Julho de 2014
©Sérgio Ricardo Lima Ribeiro

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha - IFPB, *campus* João Pessoa

R484r	<p>Ribeiro, Sérgio Ricardo Lima. Roteamento multicritério em redes ópticas elásticas dinâmicas / Sérgio Ricardo Lima Ribeiro.- 2014. 72 f. : il. Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) / Coordenação de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, 2014. Orientação : Profa. D.Sc. Rossana Moreno Santa Cruz. 1. Engenharia de comunicação elétrica. 2. Redes ópticas elásticas. 3. Algoritmo de roteamento. 4. Lógica Fuzzy. 5. Teoria da utilidade. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.391</p>
-------	--

Catálogo na fonte : Lucrecia Camilo de Lima – CRB 15/132

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

**Roteamento Multicritério em Redes Ópticas
Elásticas Dinâmicas**

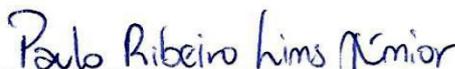
Sérgio Ricardo Lima Ribeiro

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 31 / 07 / 2014 .

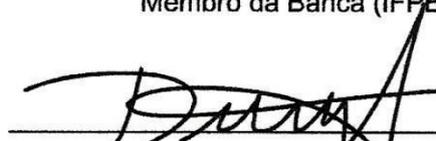
Banca examinadora:



Profa. Rossana Moreno Santa Cruz, D.Sc.
Orientadora (IFPB)



Prof. Paulo Ribeiro Lins Júnior, D.Sc.
Membro da Banca (IFPB)



Prof. Daniel Augusto Ribeiro Chaves, D.Sc.
Membro da Banca (UPE)

A Deus. A minha esposa amada, Aidê. A meu filho querido, Pablo.

Agradecimentos

- ★ A Deus, por ter me dado força, perseverança e tranquilidade para transpor os desafios da vida;
- ★ A minha esposa, Aidê Rodrigues Maia Lima, pelo apoio moral e emocional e por toda a paciência nas horas difíceis;
- ★ Ao meu filho, Pablo Rodrigues, pela compreensão da minha falta em momentos importantes da sua vida;
- ★ A minha querida Mãe, Maria das Graças, por ser uma magnífica mulher, muito dedicada e sempre presente. Ao meu Pai, Gildo Hermene, por todo carinho e dedicação. Aos meus irmãos Paulo e Danielle, pelo companherismo.
- ★ À Professora Rossana Moreno Santa Cruz, a qual tenho uma profunda gratidão, por todo o ensinamento profissional, acadêmico e pessoal. Pelo empenho incansável e dedicação na ajuda da construção desta Dissertação;
- ★ Ao Professor Paulo Ribeiro Lins Júnior, pela atenção e por estar sempre disponível, pelos conselhos que sempre me encorajaram a seguir em frente na minha história acadêmica que está apenas iniciando;
- ★ A todos os Professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica do IFPB, em especial as Professoras Silvana Costa, Suzete Correia e ao Professor Alfredo Gomes
- ★ Aos Professores do curso de Sistemas de Telecomunicações do IFPB, em especial ao Professor Luiz Guedes Caldeira;
- ★ Ao Professor Jefferson Costa e Silva, Coordenador do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) do IFPB;
- ★ Aos meus queridos amigos do Mestrado, Tarciana, Mikaelle, André, Isaac e em especial a Vinícius por estar sempre disponível quando precisei de sua ajuda e a Vanessa pela apoio moral em momentos difíceis desta etapa da minha vida.
- ★ A todos os meus familiares, em especial a Francisca Maia e Alexandre.
- ★ Aos amigos(as), Lauro Neto, Márcio Barros, Ladyjane Barros, Josinaldo Lourenço, Almir Ângelo e Fábio Monteiro, parceiros e companheiros de toda hora, que ajudam a construir o caminho da minha vida.
- ★ Ao IFPB, pelo suporte financeiro ao desenvolvimento desta Dissertação.

*“Sábio é o ser humano que tem coragem de ir diante do espelho da sua alma para reconhecer seus erros e fracassos e utilizá-los para plantar as mais belas sementes no terreno de sua inteligência”
(Augusto Cury)*

Resumo

As redes ópticas de núcleo são responsáveis pelo transporte de um tráfego com taxas de *bits* variáveis, gerado por serviços distintos. Esse tráfego irá aumentar consideravelmente à curto prazo, e as redes ópticas de núcleo terão de ser capazes de fornecer largura de banda para dar suporte a esse aumento. Vários estudos em diversas áreas já estão sendo realizados para a implementação de uma rede flexível que aumentará a eficiência do espectro óptico. Entre as áreas em desenvolvimento, pode-se destacar os algoritmos de roteamento, pela importância destes algoritmos na implementação de uma rede óptica eficiente. O roteamento em redes ópticas é considerado um problema complexo, devido a diversos fatores que podem influenciar a escolha desta rota, diminuindo a eficiência das redes. Nesse contexto, há uma necessidade de evolução das técnicas de roteamento que definem a métrica utilizada para a escolha da rota. Uma solução viável para diminuir essa complexidade é o uso de abordagens que utilizam vários critérios para definir essa métrica. O objetivo desta Dissertação é propor um método para obtenção de uma métrica para ser utilizado em técnicas de roteamento para redes ópticas elásticas dinâmicas. Utiliza-se para isso duas abordagens multicritério: Teoria da Utilidade Multiatributo e lógica *Fuzzy*. Para a definição dessa métrica são utilizados os critérios, número de enlaces na rota e quantidade de espaço disponível no espectro. Para comparar o roteamento utilizando a métrica multicritério, com as técnicas de roteamento tradicionais, são apresentados resultados de simulações realizadas em três topologias de redes distintas: NSFNET, Torus e Anel. Estes resultados são comparados com o algoritmo de caminho mais curto, *Dijkstra*, utilizando como métrica a quantidade de enlaces na rota. Além disso, o desempenho da abordagem multicritério Teoria da Utilidade Multiatributo é analisado também pela variação dos pesos atribuídos a cada critério. Na abordagem da lógica *Fuzzy*, é utilizado o método de Mamdani para a modelagem matemática que define como é calculado o custo da rota. Os resultados das simulações foram analisados para avaliar o impacto dos sistemas no desempenho das redes, estas simulações mostram que uma abordagem multicritério pode ser mais eficiente do que algoritmos que utilizam um único critério. Esta Dissertação busca mostrar que o desempenho satisfatório de um algoritmo de roteamento utilizando como métrica uma abordagem multicritério, principalmente para redes ópticas elásticas, depende de vários fatores como o tipo de topologia da rede, o tráfego e principalmente os critérios selecionados para implementação da técnica para escolha da rota, que satisfaça a necessidade de um roteamento eficiente em redes ópticas.

Palavras-Chave: Redes Ópticas Elásticas, Roteamento, Multicritério, Teoria da Utilidade, Sistemas *Fuzzy*.

Abstract

The optical core networks are responsible for the transport of traffic with variable bit rates generated by different services. This traffic will increase considerably in the short run, and optical core networks must be able to provide the bandwidth to support this increase. Several studies in various areas are already underway for the implementation of a flexible network that will increase the efficiency of the optical spectrum. Among the areas in development, can highlight the routing algorithms, the importance of such algorithms in the implementation of an efficient optical network. The routing in optical networks is considered a complex problem due to various factors that may influence the choice of route, decreasing the efficiency of these networks. In this context, there is a need for development of routing techniques that define the metrics used for choosing the route. A viable solution to reduce this complexity is the use of approaches that use various criteria to define this metric. The purpose of this dissertation is to propose a method for obtaining a metric to be used in routing techniques in elastic optical networks. Used to it two multi-criteria approaches: multi-attribute utility theory and logic Fuzzy. For the definition of this metric criteria, number of links on the route and amount of available spectrum space are used. To compare the routing metric using multiple criteria, with the traditional routing techniques, results of simulations are presented in three different topologies of networks: NSFNET, Torus and Ring. These results are compared with the shortest path algorithm Dijkstra, using metrics such as the number of links in the route. Moreover, the performance of multi-criteria approach multi-attribute utility theory is also analysis by varying the weights assigned to each criterion. In the logical Fuzzy approach the Mamdani method for the mathematical model that defines the cost of the route is used. The simulation results were analysis to evaluate the impact of the systems on network performance, these simulations show that a multi-criteria approach can be more efficient than algorithms that use a single criterion. This dissertation aims to show the satisfactory performance of a routing algorithm as a metric one using multi-criteria approach, especially for elastic optical networks depends on several factors such as type of network topology, the traffic and especially the criteria selected for implementation of the technique for choice of route that satisfies the need of an efficient routing in optical networks.

Key-Words: Elastic Optical Networks, Routing, Multi-criteria, Utility Theory, Fuzzy Systems.

Lista de Siglas e Abreviaturas

AMD – Apoio Multicritério à Decisão
BVT – *Bandwidth Variable Transponder*
CDC – *Colorless Directionless Contentionless*
CO-OFDM – *Coherent Optical OFDM*
DAB – *Digital Audio Broadcasting*
DDO-OFDM – *Detecção Direta Óptica OFDM*
DF – *Degree of Fragmentation*
DSL – *Digital Subscriber Loop*
DVB – *Digital Video Broadcasting*
EDFA – *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*
FF – *First-Fit*
FPB – Filtro Passa-Banda
FPB – Filtro Passa-Baixa
FFT – *Fast Fourier Transform*
IG – Intervalo de Guarda
ICI – *Inter Carrier Interference*
IFFT – *Inverse Fast Fourier Transform*
IQ – *In-Phase and Quadrature*
ISI – *Inter Symbol Interference*
Laser – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*
LCP – *Liquid Crystal Polymer*
Led – *Light Emitting Diode*
LTE – *Long-Term Evolution*
MAUT – *Multi-Attribute Utility Theory*
MCDM – *Multiple Criteria Decision Making*
MCM – *Multicarrier Modulation*
MDA – *Multiattribute Decision Analysis*
MLM – *Multiple-Longitudinal Mode*
MOMP – *Multiple Objective Mathematical Programming*
MSP – *Modified Smaller Path*
NSFNET – *National Science Foundation Network*

OFDM – *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*
O-OFDM – *Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
OTN – *Optical Transport Networks*
OSNR – *Optical Signal-To-Noise Ratio* PLI – *Programação Linear Inteira*
PON – *Passive Optical Network*
QoS – *Quality of Service*
ROADM – *Reconfigurable optical add-drop multiplexer*
RMSA – *Routing Modulation and Spectrum Assigment*
RSA – *Routing Spectrum Assigment*
RWA – *Routing and Wavelength Assigment*
SA – *Simulated Annealing*
SCPVS – *Spectrum Constraint Path Vector Searching*
SDH – *Synchronous Digital Hierarchy*
SLM – *Selective Laser Melting*
SONET – *Synchronous Optical Network*
SNR – *Signal-to-Noise Ratio*
WDM – *Wavelentgh Division Multiplexing*
Wi-Fi – *Wireless Fidelity*
WiMAX – *Worldwide Interoperability for Microwave Access*
WOC – *Wireless Optical Communication*
WSS – *Wavelength Selective Switching*
WXC – *Wavelength Cross Conectors*

Lista de Símbolos

\vee – Operador lógico "OU"

\wedge – Operador lógico "E"

\succ – Sinal de preferência

\sim – Sinal de indiferença

Lista de Figuras

2.1	Evolução das redes ópticas.	7
2.2	Sistemas ópticos nos segmentos tradicionais de redes de telecomunicações.	8
2.3	Arquitetura de rede WDM.	9
2.4	Espectros de redes WDM e OFDM.	10
2.5	Ortogonalidade no espectro do sinal OFDM.	11
2.6	Modelo genérico de um sistema de transmissão OFDM de RF.	12
2.7	Modelo genérico de um sistema de recepção OFDM de RF.	13
2.8	O símbolo OFDM e a extensão cíclica.	14
2.9	Utilização do espectro nas arquiteturas de rede WDM e <i>Slice</i>	16
2.10	Arquitetura de uma rede óptica elástica.	17
2.11	Caminho óptico convencional e o caminho óptico elástico.	17
2.12	Representações do espectro em redes ópticas.	20
2.13	Esquemas de especificação do recurso espectral.	21
4.1	Gráfico representando o peso de um objeto: (a) Lógica convencional, (b) Lógica <i>Fuzzy</i>	40
4.2	Componentes do conjunto <i>Fuzzy</i>	41
4.3	Operações com conjuntos <i>Fuzzy</i>	42
4.4	Exemplo de gráfico da função de pertinência para a variável quantidade de <i>slots</i> ocupados.	43
4.5	Exemplos de função pertinência.	45
4.6	Esquema do processo de Mamdani.	47
4.7	Regiões do conjunto <i>Fuzzy</i> para o critério quantidade de enlace.	48
4.8	Regiões do conjunto <i>Fuzzy</i> para o critério quantidade de <i>slots</i> ocupados.	48
4.9	Exemplo da etapa de defuzzificação do método de Mamdani.	51
5.1	Exemplo de interseção do espectro utilizado pelo algoritmo KSP.	53
5.2	Topologia NSFNET.	54
5.3	Topologia Torus.	54
5.4	Topologia Anel.	55
5.5	Fluxograma do simulador RSA.	55
5.6	Resultado da simulação: <i>Dijkstra versus</i> Função Utilidade – Topologia NSFNET.	59
5.7	Resultado da simulação: <i>Dijkstra versus</i> Função Utilidade – Topologia Torus.	59
5.8	Resultado da simulação: <i>Dijkstra versus</i> Função Utilidade – Topologia Anel.	60
5.9	Resultado da simulação: <i>Dijkstra versus Fuzzy</i> – Topologia NSFNET.	61

5.10 Resultado da simulação: <i>Dijkstra versus Fuzzy</i> – Topologia Torus.	62
5.11 Resultado da simulação: Função Utilidade <i>versus Fuzzy</i> – Topologia NSFNET.	63
5.12 Resultado da simulação: Função Utilidade <i>versus Fuzzy</i> – Topologia Torus.	63

Lista de Tabelas

3.1	Matriz Utilidade.	31
3.2	Valores utilizados na definição dos pesos.	36
4.1	Variáveis linguísticas dos critérios.	48
4.2	Conjunto de regras para a base de conhecimento <i>Fuzzy</i>	49
4.3	Exemplo do método de Mamdani.	50
5.1	Pesos utilizados em cada alternativa de simulação com a função utilidade.	58

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Justificativa	3
1.3	Objetivos	4
1.3.1	Objetivo Geral	4
1.3.2	Objetivos Específicos	4
1.4	Organização do Trabalho	5
2	Roteamento e Alocação de Espectro em Redes Ópticas Elásticas	6
2.1	Redes Ópticas	6
2.1.1	Avanços Recentes em Redes Ópticas	8
2.2	Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda	9
2.3	Multiplexação por Divisão Ortogonais de Frequências	10
2.3.1	Sistemas OFDM	12
2.3.2	Sistemas OFDM Óptico	14
2.4	Redes Ópticas Elásticas	15
2.4.1	Arquitetura de Redes Ópticas Elásticas Baseada em OFDM	16
2.5	Roteamento e Alocação de Espectro em Redes Ópticas Elásticas	18
2.5.1	RSA Estático	19
2.5.2	RSA Dinâmico	19
2.5.3	Representação do Espectro	20
2.5.4	Problema RSA	21
2.5.5	Alocação de Espectro	23
2.5.6	Roteamento	24
2.5.7	Roteamento com abordagem multicritério	26
3	Teoria da Utilidade Multiatributo	28
3.1	Apoio Multicritério à Decisão	28
3.2	Axiomas da Teoria da Utilidade	29
3.3	Características da MAUT	31
3.3.1	Escolha dos Critérios	31

3.3.2	Definindo critérios para o problema de roteamento	32
3.4	Definindo a Função Custo para Roteamento Multicritério	33
3.4.1	Função Utilidade	33
3.4.2	Função Utilidade Para o Critério (E)	34
3.4.3	Função Utilidade Para o Critério (S)	34
3.4.4	Função Utilidade Multicritério Aditiva	35
3.4.5	Definição dos Pesos para os Critérios	36
4	Lógica <i>Fuzzy</i>	39
4.1	Teoria dos Conjuntos <i>Fuzzy</i>	39
4.1.1	Operações	40
4.1.2	Variáveis Linguísticas	42
4.1.3	Proposições e Regras <i>Fuzzy</i>	43
4.1.4	Funções de Pertinência	44
4.2	Roteamento Utilizando a Lógica <i>Fuzzy</i>	46
4.2.1	A Lógica <i>Fuzzy</i> de Mamdani	46
5	Simulação e Resultados	52
5.1	Roteamento utilizando MAUT	58
5.1.1	Resultados	58
5.2	Roteamento utilizando <i>Fuzzy</i>	60
5.2.1	Resultados	60
5.3	Função Utilidade <i>versus Fuzzy</i>	62
6	Conclusão	64
	Referências Bibliográficas	72

1.1 – Motivação

O crescimento da demanda por largura de banda torna imprescindível o desenvolvimento das tecnologias de rede de núcleo, responsáveis pela transmissão em altas taxas de dados. As redes ópticas proporcionam enorme capacidade de transporte de dados e uma infraestrutura comum sobre a qual uma variedade de serviços podem ser entregues. Essas redes também são capazes de fornecer alta largura de banda de forma flexível.

Vários fatores têm impulsionado o desenvolvimento das redes ópticas: o crescimento da velocidade média da banda larga na rede de acesso, que estima-se aumentar em torno de 3,5 vezes nos próximos 5 anos, baseando-se na estimativa de 3,6 bilhões de usuários da Internet em 2017 [1]; o aumento da transmissão de informações multimídia; a necessidade de grandes empresas se interligarem por redes de altas velocidades; a redução do custo da largura de banda, acarretando assim um maior tempo de uso e, conseqüentemente, estimulando o desenvolvimento de aplicativos que aproveitam melhor a banda disponível. Esses aspectos constituem um desafio cada vez maior para a evolução das redes de núcleo, em especial as redes de fibra óptica [2].

A popularização da Internet e dos serviços a ela correlacionados criou uma forte exigência de qualidade de serviço sobre a infraestrutura das redes de comunicações, que está diretamente ligada a fatores como alta taxa de transmissão e alta disponibilidade, tornando-se importante para o provimento de uma comunicação eficiente.

Adicionalmente, surge uma grande demanda por *Data Centers* capazes de manipular e tratar um grande volume de dados que precisam ser transferidos, que pode chegar à ordem de *terabytes* e *petabytes*, necessitando de uma infraestrutura de rede cuja capacidade está disponível apenas na tecnologia óptica [3].

Buscando maximizar o uso da largura de banda em redes ópticas, e tentando satisfazer as necessidades citadas, as pesquisas têm dado ênfase às redes ópticas de transporte (*Optical Transport Networks* – OTN), que representam uma solução tecnológica para as telecomunicações nas redes de núcleo. A combinação entre OTNs e a tecnologia de multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing* – WDM) é considerada a principal evolução dessas redes, devido à sua alta capacidade de transporte de dados. A OTN define um esquema de multiplexação similar ao do SONET/SDH, porém transporta dados nativamente

a taxas de 1,25 Gbits/s, 2,5 Gbits/s, 10 Gbits/s, 40 Gbits/s e 100 Gbits/s. A necessidade de multiplexação decorre do fato de que, para a maioria das aplicações, é muito mais econômico transmitir dados a taxas mais elevadas ao longo de uma única fibra, do que transmitir a taxas mais baixas por meio de múltiplas fibras. Assim, a multiplexação WDM fornece vários caminhos virtuais, denominado comprimento de onda, utilizando fisicamente uma única fibra, com cada fibra carregando vários fluxos de dados [2].

O crescimento do tráfego de Internet destaca a importância das plataformas de transporte de largura de banda flexível com alta granularidade, devido ao dinamismo nas mudanças das taxas de dados transmitidas e nos padrões geográficos de tráfego, exigindo uma variação na utilização da largura de banda para um uso mais otimizado do espectro. A arquitetura de rede com taxa de bits flexível baseada em multiplexação por divisão ortogonal de frequências (*Orthogonal frequency-division multiplexing* – OFDM) tem sido proposta como uma solução promissora para enfrentar o desafio de melhorar a capacidade de transporte. Redes ópticas com largura de banda variável não podem apenas fornecer caminhos ópticos de largura de banda flexível, mas também incluir uma alta capacidade de comutação totalmente óptica e melhorar a eficiência espectral [4]. A utilização eficiente do espectro é amplamente estudada para a resolução do problema de roteamento e alocação de espectros (*Routing and Spectrum Assignment* – RSA).

Há uma necessidade de se investigar métodos eficientes para a resolução do problema de roteamento e alocação de espectro, principalmente para grandes redes, que tem como objetivo aumentar a flexibilidade e a eficiência espectral. O problema RSA é uma variação do problema de alocação de rota e comprimento de onda (*Routing and Wavelength Assignment* – RWA), o qual é característico em redes ópticas.

Um desafio nessa direção diz respeito às técnicas de roteamento, comutação e alocação de espectro. Para atingir tais objetivos, as redes tendem a evoluir visando flexibilidade, heterogeneidade e uso eficiente de seus recursos na conexão [5]. As tecnologias de redes de transporte precisam ser adaptadas às novas necessidades, evoluindo para as chamadas redes de próxima geração, com novos requisitos de qualidade de serviço (*Quality of Service* – QoS), dinamicidade de tráfego e necessidade de uso eficaz da largura de banda.

Das técnicas citadas, pode-se considerar roteamento como a mais importante, pois para estabelecer uma rota apropriada ao longo de um caminho, estratégias de roteamento eficientes devem ser utilizadas. Uma das estratégias mais simples para encontrar uma rota para um destino é o roteamento fixo, que usa rotas pré-estabelecidas. Nesse contexto, a qualidade das rotas não depende das condições dinâmicas da rede. Uma nova decisão sobre a rota ideal tem que ser feita se a topologia da rede é modificada. Em caso de tráfego sem variação no tempo, as vantagens desta estratégia são a simplicidade e a confiabilidade, mas no caso de uma rede dinâmica, a falta de flexibilidade é uma desvantagem [6].

Para se ter flexibilidade, é utilizada a técnica de roteamento adaptativo, na qual há mudanças de decisões de roteamento em caso de mudanças dinâmicas na topologia da rede

ou na carga. A maioria das estratégias de roteamento adaptativo precisa de informações sobre a topologia da rede, a carga do tráfego e os custos de caminhos [6] [7].

As redes ópticas atuais lidam com uma grande variedade de serviços, diferentes classes de carga e taxas de *bits* variável. Essas exigências precisam de novas estratégias de roteamento. Nesse contexto, há a necessidade de estudar técnicas de roteamento que possam levar em consideração uma variedade de parâmetros, como parâmetros topológicos e de carga. Métodos multicritério como a Teoria da Utilidade Multiatributo e os sistemas *Fuzzy* podem ser usados para resolver essa tarefa complexa, conforme será discutido neste trabalho.

1.2 – Justificativa

A multiplexação por divisão de comprimento de onda tornou eficiente o uso da capacidade de rede ao multiplexar um número considerável de comprimentos de onda dentro de uma fibra, proporcionando um uso mais eficiente dos recursos disponíveis. No entanto, ainda apresenta desvantagens significativas, devido à sua grade inflexível. Por exemplo, se a taxa de *bits* do tráfego necessitar de uma largura de banda menor do que a do comprimento de onda, o tráfego vai subutilizar este comprimento de onda. Por outro lado, se a taxa de *bits* do tráfego necessitar de uma largura de banda maior, será utilizado mais de um comprimento de onda para acomodar essa demanda [4].

O crescimento do tráfego de Internet é um desafio constante em redes ópticas de transporte. O tráfego da Internet apresenta taxas de transmissão (*bits/s*) variadas exigindo uma infraestrutura de redes ópticas escalável com capacidade de adaptação ao tipo de tráfego. Aumentar a capacidade de transporte, melhorar a eficiência da utilização de recursos e permitir o transporte multigranularidade são alguns requisitos indispensáveis nas futuras redes ópticas. Para atender a esses requisitos, há estudos avançados em redes de fibra óptica com espectro flexível, denominada rede óptica elástica baseada na multiplexação por divisão ortogonal de frequências. Com relação a esse tipo de rede, vários trabalhos têm voltado a atenção para o problema RSA [4].

A multiplexação OFDM foi introduzida em redes ópticas de transporte como uma tecnologia de transmissão promissora devido à sua grande capacidade, alta eficiência espectral e largura de banda flexível. Os caminhos ópticos (*lightpaths*) OFDM suportam o transporte do tráfego de granularidade variada. Utilizando tecnologias de transmissão OFDM, os pesquisadores propuseram uma nova arquitetura de rede óptica com a grade espectral flexível (*gridless* - sem grade), denominada redes ópticas elásticas ou simplesmente redes SLICE (*Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network*), em que o gerenciamento e os elementos da rede darão suporte para que a largura de banda dos caminhos ópticos seja flexível, ou seja, possa expandir-se e contrair-se livremente de acordo com os requisitos de QoS e da taxa de transmissão [8] [9] [10].

O Problema de roteamento é encontrado em todas as redes que não permitem que os dados transmitidos alcancem o destino em um único salto na transmissão, tendo que atravessar

um caminho com vários enlaces intermediários. Nesse contexto, existem diversos fatores que podem afetar o desempenho da rede, como atraso na transmissão, quantidade de enlaces das rotas, alocação ineficaz do espectro etc. Portanto, pode-se considerar o problema de roteamento como um problema de otimização combinatória [6].

A maioria das estratégias de roteamento devido a razões de complexidade, consideram apenas um parâmetro de entrada. Durante os últimos anos, há uma tendência geral para levar em conta mais parâmetros usando métodos não analíticos para diminuir a complexidade [6] [7].

A proposta deste trabalho é utilizar mais do que um critério na obtenção da função custo e esta ser utilizada pelos algoritmos de roteamento em redes ópticas elásticas. Assim, pretende-se investigar métodos eficientes para a resolução do problema de roteamento utilizando, para isso, técnicas de abordagem multicritério, buscando maximizar o uso da largura de banda e minimizar as probabilidades de bloqueio em redes ópticas elásticas.

1.3 – Objetivos

1.3.1 – Objetivo Geral

Propor novas métricas para roteamento em redes ópticas elásticas dinâmicas, utilizando uma abordagem multicritério baseada na Teoria da Utilidade Multiatributo e nas regras da Lógica *Fuzzy*.

1.3.2 – Objetivos Específicos

1. Pesquisar e analisar os principais modelos atuais de algoritmos de roteamento em redes ópticas elásticas, estudando suas particularidades em relação às redes ópticas dinâmicas, com a finalidade de escolher o modelo mais viável para implementar um método de roteamento multicritério;
2. Estudar a Teoria da Utilidade Multiatributo, analisando seus conceitos, com o objetivo de utilizá-los para definir uma expressão que será utilizada como função custo para a escolha da melhor rota em redes ópticas elásticas;
3. Pesquisar e estudar os métodos da Teoria da Lógica *Fuzzy*, com a finalidade de escolher o melhor método para construir um modelo matemático e gerar uma função custo que será utilizada em roteamentos de redes ópticas elásticas;
4. Implementar o algoritmo RSA escolhido com as funções custos definidas para roteamento, utilizando a Teoria da Utilidade Multiatributo e o método *Fuzzy*;
5. Realizar simulações com o algoritmo RSA, utilizando o roteamento multicritério, com o intuito de obter dados para analisar a viabilidade dos critérios escolhidos;

6. Comparar os resultados do algoritmo RSA utilizando o roteamento *Dijkstra* e o roteamento multicritério, analisando a eficiência desses algoritmos.

1.4 – Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos. No Capítulo 2, é abordada a evolução das redes ópticas, dando ênfase às redes ópticas multiplexadas por divisão ortogonal de frequências (OFDM). São descritas as principais características dessas redes e a sua importância no estudo das redes ópticas elásticas, em que o principal foco está na solução do problema de roteamento e alocação de espectro (RSA). Outro ponto discutido é a importância de se estudar o processo de roteamento em redes ópticas, explicando, para isso, os tipos de roteamentos existentes, enfatizando que o problema de roteamento pode ser abordado como um problema multicritério.

No Capítulo 3, é discutida a Teoria da Utilidade Multiatributo (*Multiple Attribute Utility Theory* – MAUT). São abordados seus principais axiomas e características, ressaltando como a MAUT surgiu a partir do método de apoio multicritério à decisão. Em seguida, mostra-se a importância das escolhas dos critérios para a definição da função custo. São escolhidos os critérios, e assim, definida a função custo utilizada no algoritmo RSA. Por fim, são determinados os pesos para cada critério, utilizando o método da taxa de substituição.

No Capítulo 4, são apresentados os conceitos da Lógica *Fuzzy*, iniciando com a teoria dos conjuntos *Fuzzy*, explicando as variáveis linguísticas, suas propriedades, as proposições com os conectivos lógicos e a importância da função pertinência em sistemas *Fuzzy*. Também é formulado o sistema *Fuzzy* que vai definir a função custo para o roteamento. Para tanto, é utilizado o modelo lógico de Mamdani [11] e, a partir dele, são realizadas todas as etapas do processo *Fuzzy*: Fuzzificação, Inferência e Defuzzificação.

No Capítulo 5, é explicado com detalhes o algoritmo RSA escolhido para as simulações, com os algoritmos de roteamento multicritério utilizando as funções custo determinadas pela Teoria da Utilidade Multiatributo e por um sistema *Fuzzy*. Em seguida, são mostrados os resultados das simulações em três topologias de redes distintas: NSFNET, Torus e Anel. Por fim, os resultados são discutidos e é feita uma comparação do desempenho dos algoritmos de roteamento utilizados.

Para concluir, são apresentadas as considerações finais sobre os resultados das simulações, as contribuições desta pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

Roteamento e Alocação de Espectro em Redes Ópticas Elásticas

Nos próximos anos, as previsões indicam uma tendência de crescimento do tráfego de Internet na rede de núcleo, devido a novas aplicações, tais como, comunicações de vídeo de alta definição sendo transmitidos em tempo real e aumento das aplicações de computação em nuvem [12]. Esse crescimento exige redes de fibra óptica com as seguintes características, suporte à taxa de dados flexível, agilidade, reconfigurabilidade e recursos eficientes, diferente da atual configuração com a granularidade fixa da tecnologia WDM, que restringe a rede de fibra óptica levando a um provisionamento de largura de banda sem recursos e uma utilização ineficiente do espectro [13] [14].

A arquitetura de rede com taxa de *bits* flexível baseada em OFDM tem sido proposta como uma solução promissora para enfrentar esse desafio. Redes ópticas com largura de banda variável, tem que fornecer de forma agregada caminhos ópticos de largura de banda flexível com alta capacidade de comutação totalmente óptica, visando melhorar a eficiência do espectro [4]. A utilização eficiente do espectro vem sendo largamente estudada para a resolução do problema de roteamento e alocação de espectros (RSA).

2.1 – Redes Ópticas

A evolução das redes ópticas é dividida em duas gerações. A primeira geração óptica foi essencialmente utilizada para transmissão com fornecimento de alta capacidade de banda. Toda a parte de comutação e outras funções de rede foram manipuladas pela eletrônica. Exemplos da primeira geração de redes ópticas são as redes ópticas síncronas (*Synchronous Optical Network* – SONET) e a hierarquia digital síncrona (*Synchronous Digital Hierarchy* – SDH). Na segunda geração de redes ópticas, o principal motor que impulsiona o avanço tecnológico é a possibilidade de incorporar funções de comutação e encaminhamento na camada óptica [2].

A Figura 2.1 apresenta uma visão geral da evolução e dos fatores que moldaram os sistemas de transmissão e redes de fibra óptica. Na Figura 2.1(a) é mostrado o esquema dos primeiros sistemas de telecomunicações (final dos anos de 1970 e início da década de 1980) que utilizaram fibras multimodo, juntamente com leds (*Light Emitting Diode*) ou laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) no comprimento de onda de 0,8 μm e 1,3

μm . Leds são de baixo consumo de energia. Um laser proporciona maior potência de saída, permitindo que o sinal atinja longas distâncias antes da regeneração. Os primeiros sistemas tinham que ter regeneradores com poucos quilômetros de distância entre eles para regenerar o sinal, a limitação da distância foi principalmente devido a um fenômeno conhecido como dispersão intermodal. A próxima geração de sistemas implantados, começou por volta de 1984, e usava fibras monomodo, como meio de eliminar a dispersão intermodal, juntamente com lasers operando na faixa de comprimentos de onda de de $1,3 \mu m$ (Figura 2.1(b)) e $1,55 \mu m$ (Figura 2.1(c)), permitindo uma distância ainda maior entre os regeneradores, surgindo outro problema, a dispersão cromática, que começou a se tornar um fator limitante na medida em que aumentavam as taxas de *bits*. O próximo marco importante na evolução dos sistemas de transmissão de fibra óptica foi o desenvolvimento de amplificadores de fibra dopada com érbio (*Erbium-Doped Fiber Amplifiers* – EDFA) no final dos anos 1980 e início dos anos 1990. Sistemas WDM com EDFAs (Figura 2.1(d)) foram implantados a partir de meados dos anos 1990 e hoje atingem capacidades maiores que $1 Tbits/s$ em uma única fibra [2]. Ao mesmo tempo, taxas de transmissão de *bits* em um único canal subiram para $100 Gbits/s$ [15].

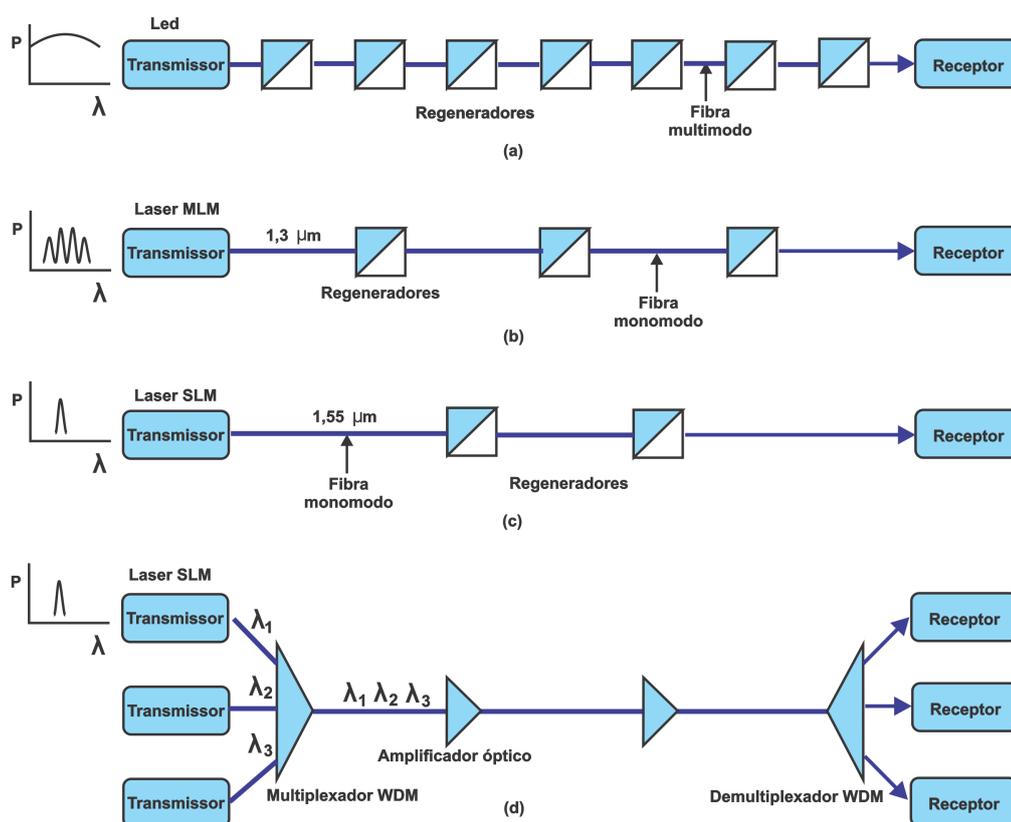


Figura 2.1 – Visão geral da evolução das redes ópticas. Adaptado de [2].

2.1.1 – Avanços Recentes em Redes Ópticas

Quatro características principais têm impulsionado o avanço das redes ópticas, que têm sido cada vez mais implantadas pelos prestadores de serviços de comunicação em todo o mundo [16]:

1. alta capacidade e flexibilidade: canais com capacidade acima de 100 Gbits/s, habilitados pelo avanço nas tecnologias de transmissão óptica, incluindo espaçamento de espectro variável e novos esquemas de modulação;
2. alcance: oportunidade para transmitir canais totalmente ópticos por vários milhares de quilômetros, com menos amplificadores e regeneradores comparando com as primeiras gerações das redes ópticas;
3. opções de enquadramento: suporte para múltiplas opções de enquadramento que vão desde pacotes de *streaming* até rajadas especializadas para circuitos fim-a-fim;
4. programação e reconfiguração: infraestrutura, *software* e *hardware* programáveis, com um amplo portfólio de controle e gestão de rede, permitindo configuração dinâmica do canal e virtualização de infraestrutura.

Essas características têm sido responsáveis pelo aumento dos sistemas ópticos nos segmentos tradicionais de redes de telecomunicações, ou seja, acesso, distribuição e núcleo, como é mostrado na Figura 2.2. A demanda por conexões de rede óptica de alta velocidade está se estendendo a partir de redes de núcleo para usuários corporativos e residenciais, transformando o segmento de acesso da rede tradicional e criando dois novos mercados distinto com novas tendências tecnológicas, ou seja, acesso celular *backhaul* e acesso privado. Os planos de controle e gestão tradicionais para redes ópticas também estão evoluindo para atender às exigências dos mais diversos tipos de tráfego e serviços [16].

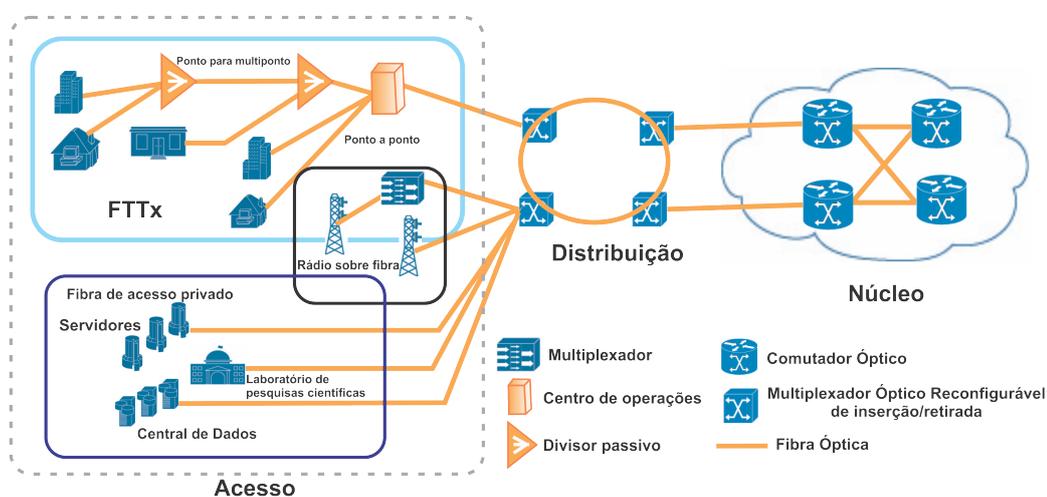


Figura 2.2 – Sistemas ópticos nos segmentos tradicionais de redes de telecomunicações. Adaptado de [16].

2.2 – Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda

Até o início da década de 1990, duas das principais inovações já haviam sido realizadas em transmissão óptica. Em primeiro lugar, vários canais de luz, ou comprimentos de onda, podem ser multiplexados em conjunto em uma única fibra, dando origem à multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM). Em segundo lugar, o amplificador de fibra dopada com érbio (EDFA) foi desenvolvido para amplificar todos os comprimentos de onda transportados em uma fibra, em vez de terem um amplificador por comprimento de onda. Juntas, essas duas inovações aumentaram drasticamente a capacidade da rede [17].

A tecnologia de redes ópticas com roteamento de comprimento de onda amadureceu e, atualmente, é a forma mais apropriada para suportar a crescente demanda de tráfego nas redes de transporte que compõem as infraestruturas de telecomunicações da Internet. Atualmente, sistemas WDM com até 40 Gbits/s de capacidade por canal foram implantados em redes de núcleo, enquanto interfaces de 100 Gbits/s estão agora disponíveis comercialmente e a implantação dessas interfaces em larga escala já estão sendo realizadas em alguns países. Além disso, prevê-se a necessidade que as redes ópticas suportem transmissão da classe de Tbits/s num futuro próximo [14].

A arquitetura de uma rede WDM é mostrada na Figura 2.3. A rede oferece caminhos de luz (*lightpaths*) para os usuários. *Lightpaths* são conexões ópticas fim-a-fim de um nó origem para um nó de destino por meio de um comprimento de onda. Em nós intermediários da rede, os *lightpaths* são roteados e mudam de um enlace para outro, podendo em alguns casos serem convertidos de um comprimento de onda para outro. Diferentes *lightpaths* em um encaminhamento de rede podem usar o mesmo comprimento de onda em fibras diferentes. Isto permite que o mesmo comprimento de onda seja reutilizado espacialmente em diferentes partes da rede [2].

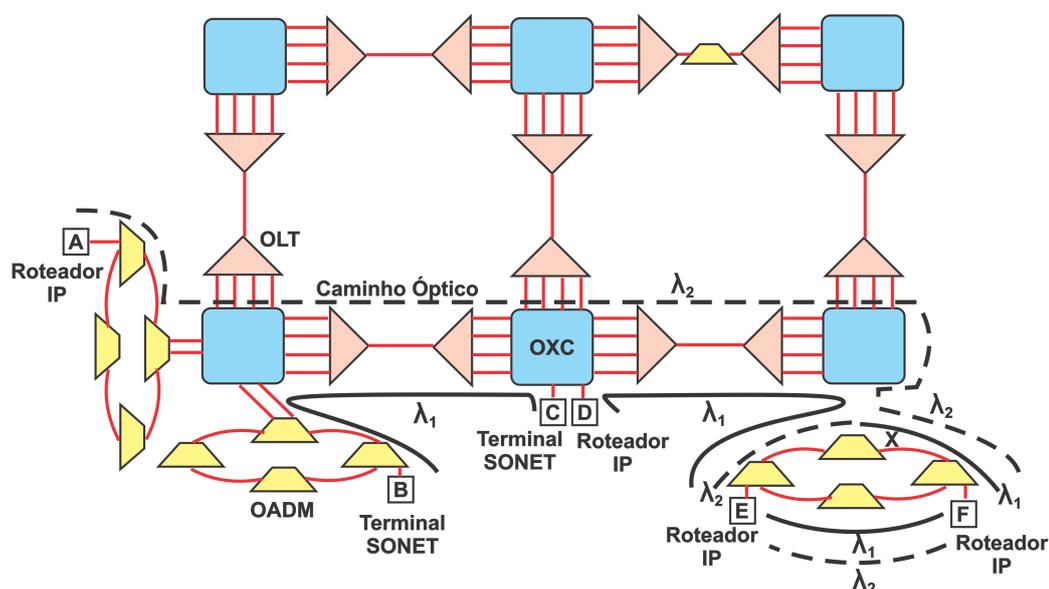


Figura 2.3 – Arquitetura de rede WDM. Adaptado de [2].

A tecnologia WDM trouxe várias vantagens para os sistemas de transmissão óptica, dentre as principais, pode-se destacar a possibilidade de combinar diversas tecnologias, independente do fabricante, por meio do uso de transponders, cujo objetivo é receber, amplificar e retransmitir um sinal em uma frequência diferente ou transmitir de uma fonte uma mensagem pré-determinada em resposta à outra pré-definida de outra fonte [18].

Uma arquitetura de rede com taxa de *bits* flexível baseada em OFDM tem sido proposta como uma solução promissora para o problema das arquiteturas WDM. Redes ópticas com largura de banda variável podem fornecer caminhos ópticos de largura de banda flexível, e também alta capacidade de comutação totalmente óptica, além de melhorar a eficiência do espectro [19].

2.3 – Multiplexação por Divisão Ortogonais de Frequências

O sistema OFDM surgiu nos anos 1960. Em seu trabalho, Chang [20] apresentou o princípio de transmissão de dados em vários canais limitados em banda sem causar interferência entre portadoras (*Inter Carrier Interference* – ICI) e interferência entre símbolos (*Inter Symbol Interference* – ISI) [21].

A tecnologia OFDM é uma classe especial de esquema de Modulação Multiportadora (*Multicarrier Modulation* – MCM), dividindo o espectro em canais ortogonais, referidos como subportadoras, cada uma transmitindo uma taxa de dados menor. Comparada aos sistemas WDM, em que um espaçamento de canal fixo entre os comprimentos de onda são necessários para eliminar a interferência, a técnica OFDM permite que as subportadoras individuais sobreponham-se, por causa da sua ortogonalidade, conforme é mostrado na Figura 2.4 [19].

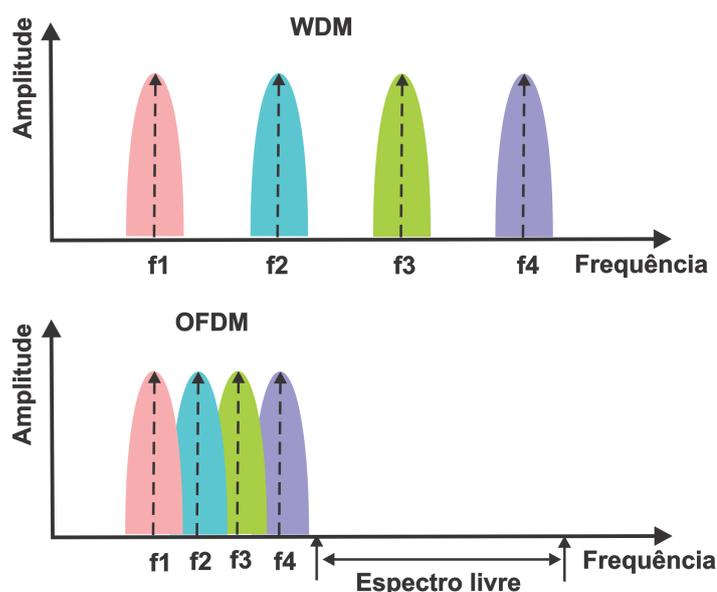


Figura 2.4 – Espectros de redes WDM e OFDM. Adaptado de [19].

A condição ortogonal entre as subportadoras é satisfeita quando as suas frequências centrais estão espaçadas com distância n/T_s , em que n é um número inteiro e T_s é a duração do símbolo. Na Figura 2.5 pode-se visualizar que o ponto de pico do espectro de uma subportadora corresponde ao ponto zero do espectro de outras subportadoras. Portanto, quando uma subportadora é amostrada no seu pico, todas as outras subportadoras estão cruzando o zero naquele ponto e assim não interferem com a subportadora amostrada. Esta ortogonalidade leva a um uso mais eficiente dos recursos espectrais [14] [13].

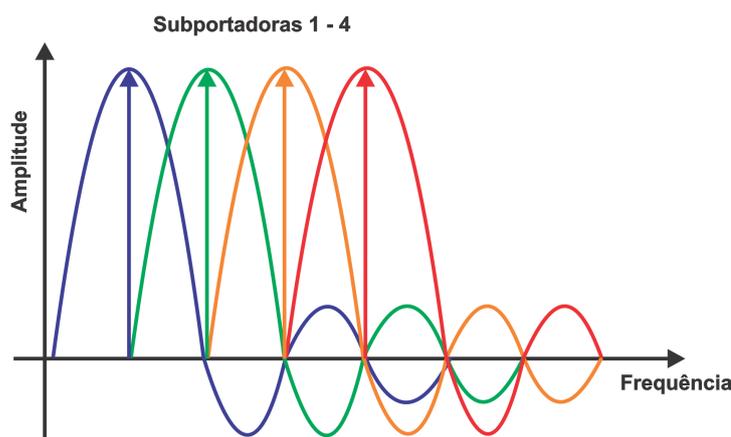


Figura 2.5 – Ortogonalidade no espectro do sinal OFDM. Extraído de [13].

A técnica OFDM foi utilizada inicialmente como uma tecnologia de camada física em comunicações sem fio e atualmente é amplamente adotada em padrões de rede de banda larga com e sem fio, tais como, 802.11a–g *Wi-Fi*, 802.16 *WiMAX*, *Long-Term Evolution* (LTE), *Digital Audio Broadcasting* (DAB), *Digital Video Broadcasting* (DVB) e *Digital Subscriber Line* (DSL) [22].

A tecnologia OFDM tem muitas vantagens que são a chave para o futuro dos sistemas de transmissão, principalmente para o sistema de transmissão óptico. Como principais vantagens podem ser citadas [23]:

- ▀ Robustez contra a dispersão de canal e facilidade de estimação de fase de canal em um ambiente variante no tempo;
- ▀ Alta imunidade a multipercursos e redução significativa da taxa de sinalização do canal devido ao sistema multiportadora;
- ▀ Permite escalabilidade, simplesmente aumentando a quantidade de subportadoras, sem grandes mudanças no projeto do sistema. Por isso, é considerada altamente flexível para um aumento de taxa de dados cada vez mais rápido;
- ▀ Utilização eficiente do espectro com o arranjo de sobreposição de subportadoras e possibilidade de empregar vários tipos de modulação de acordo com a distância de transmissão;

- ▣ Redução do consumo de energia com a comutação dinâmica, devido ao processo de "ligar/desligar" subportadoras específicas de acordo com a condição do canal e a exigência da largura de banda;

2.3.1 – Sistemas OFDM

Um modelo genérico de um sistema de transmissão OFDM é mostrado na Figura 2.6. No início, o fluxo de entrada de dados em série é convertido em vários fluxos de dados paralelos utilizando um conversor de série para paralelo. Em seguida, os símbolos de treinamento são inseridos periodicamente para calcular a estimativa do canal. Esses fluxos de dados paralelos são modulados em subportadoras ortogonais, aplicando a Transformada Rápida Inversa de Fourier (*Inverse Fast Fourier Transform – IFFT*). A partir de funções seno e cosseno de frequência angular, obtêm-se as partes real e imaginária, respectivamente, do sinal OFDM no domínio do tempo [21]. Em seguida, um prefixo cíclico é adicionado em cada símbolo OFDM para evitar a dispersão do canal. Após o sinal OFDM ser convertido para analógico, é filtrado com um filtro passa-baixa, produzindo o sinal OFDM em banda base. O sinal em banda base pode ser convertido para um sinal de radiofrequência (RF) adequado, com uma banda passante modulada em fase e quadratura (*in-phase and quadrature – IQ*) e um filtro passa-faixa [14].

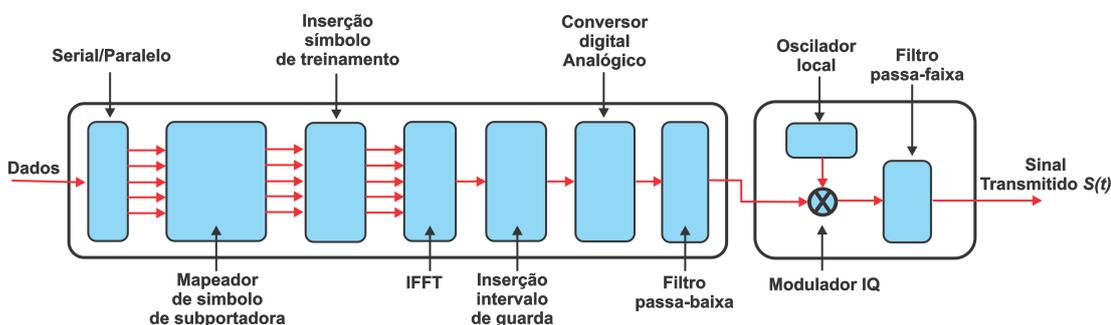


Figura 2.6 – Modelo genérico de um sistema de transmissão OFDM de RF. Adaptado de [14].

No receptor, o sinal OFDM é convertido em banda base com o demodulador IQ, depois é amostrado com um conversor analógico-digital e, em seguida, a forma complexa do sinal OFDM é demodulada com a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform – FFT*). Os sinais demodulados passam por um módulo de decisão de símbolos, no qual a sincronização, a estimativa de canal e a compensação são executadas antes da decisão do símbolo ser feita. Finalmente, em uma operação paralelo para serial, vários canais de dados são convertidos de volta para um único fluxo de dados [14]. Na Figura 2.7, é mostrado um modelo genérico de um receptor OFDM de RF.

Decorrido o tempo do símbolo OFDM em T segundos, o valor de amplitude de cada subportadora é atualizado com os dados no próximo símbolo. Além disso, em um sistema OFDM, todos os osciladores complexos do transmissor e do receptor devem estar em fase. Quanto maior for o número de subportadoras no sistema, maior será a dificuldade em se obter o sincronismo

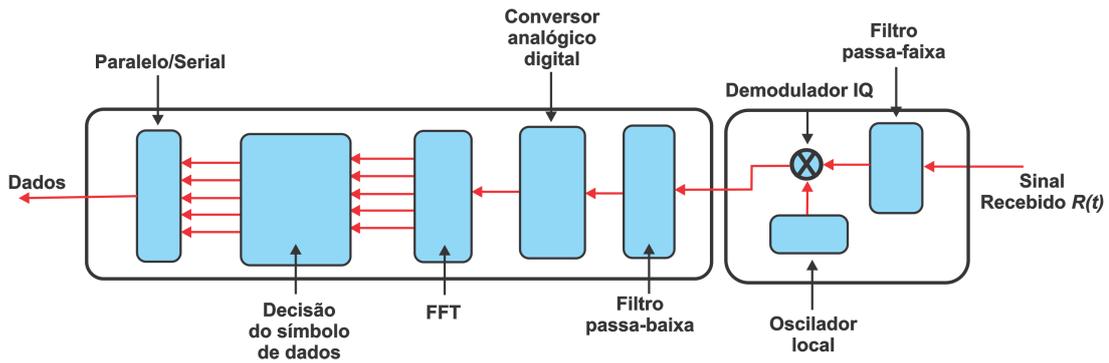


Figura 2.7 – Modelo genérico de um sistema de recepção OFDM de RF. Adaptado de [14].

entre os osciladores, aumentando a complexidade de implementação, que pode inviabilizar o uso desta técnica [23].

Uma das técnicas utilizadas pelo sistema OFDM é a inserção de um intervalo de guarda (*Guard Interval – GI*) [24]. Em redes ópticas, a velocidade da fase de um impulso óptico depende da sua frequência. Componentes de frequência diferentes viajam com pulsos ópticos de velocidades diferentes, de modo que os pulsos ópticos são espalhados após a transmissão, problema conhecido como dispersão cromática. Devido a este fenômeno de dispersão, um símbolo que atinge um grande atraso em uma transmissão de longa distância pode atravessar a fronteira do símbolo vizinho, causando a interferência inter-simbólica (ISI) e perdendo a condição essencial para a ortogonalidade das subportadoras, resultando em uma interferência interportadora (ICI) [19].

Para resolver o problema de ISI, um intervalo de guarda é inserido no símbolo OFDM. Porém, para que isto funcione, é necessário que o tamanho do intervalo de guarda seja maior que a dispersão temporal do canal, ou seja, o atraso máximo de um sinal refletido que chega ao receptor deve ter uma duração menor que a duração do intervalo de guarda [21]. Já a ICI pode ser reduzida por meio da introdução de um prefixo cíclico no intervalo de guarda. O prefixo cíclico é uma cópia do início do símbolo que é colocada como intervalo de guarda no final do símbolo, como pode ser visto na Figura 2.8 [19]. Uma consequência importante da inserção do prefixo cíclico é que o sinal fica menos suscetível a problemas de multipercurso, desde que o intervalo entre o sinal principal e o eco mais longo seja mais curto do que o prefixo cíclico. Durante o tempo do prefixo cíclico, não há transmissão de informação útil, ocasionando uma queda na eficiência de utilização do canal [25].

A duração total do símbolo é de $T_{total} = T_g + T$, em que T_g é o tempo de guarda, ou o tempo do prefixo cíclico, e T é a duração do próprio símbolo. A duração do intervalo de guarda depende da duração do símbolo OFDM. Quanto maior for a duração do intervalo de guarda, menos dados úteis poderão ser transmitidos. Geralmente, $T_g < T/4$. A maioria das implementações usa 20% do sinal para a parcela de prefixo cíclico [26].

Outras técnicas são utilizadas para melhorar a eficiência dos sistemas de transmissão OFDM, entre as principais podem ser citadas a estimativa de canal e a adaptação de enlace.

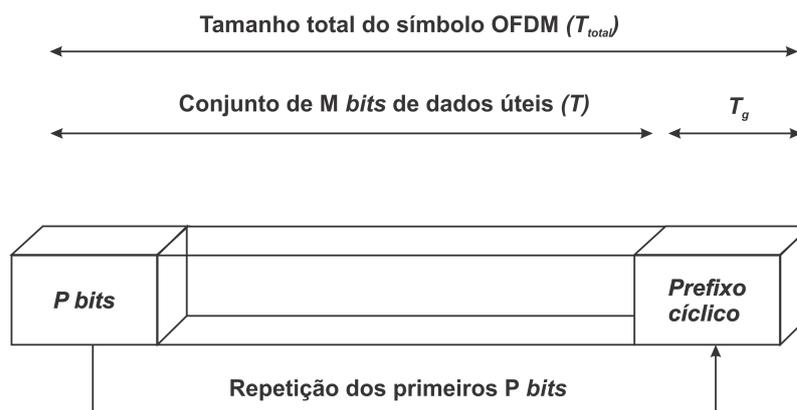


Figura 2.8 – O símbolo OFDM e a extensão cíclica. Adaptado de [25].

A estimativa de canal tenta resolver o problema de variação de tempo e frequência que afeta o desempenho dos canais. O efeito do canal no sinal transmitido necessita ser estimado para que a informação transmitida seja recuperada de forma eficiente [27].

A informação do estado do canal pode ser estimada utilizando a estimativa de canal não cego ou a estimativa de canal cego. Na estimativa de canal não cego, símbolos de treinamento contendo informação conhecida pelo emissor e pelo receptor são inseridos periodicamente em subportadoras de suporte de dados. As informações do estado de canal podem ser estimadas com base nos símbolos de treinamento utilizando algoritmos de estimação de canal. Estimativa de canal cego é um método mais complexo, utiliza as características intrínsecas do sinal modulado para estimar o estado de canal. Este sistema exige um projeto cuidadoso do algoritmo de estimativa de canal de tal forma que o sistema tem que convergir em todas as condições [14].

2.3.2 – Sistemas OFDM Óptico

O estudo da tecnologia OFDM em comunicações ópticas tem proporcionado um grande desafio para a comunidade acadêmica e para os fabricantes de equipamentos. No contexto atual de transmissão óptica, inúmeros trabalhos têm mostrado que a modulação OFDM é uma tecnologia promissora para as comunicações ópticas [28]. Esses sistemas são referidos como Modulação por Divisão Ortogonais de Frequências Ópticas (*Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing – O-OFDM*) [28].

A Tecnologia O-OFDM pode ser usada em uma variedade de sistemas de comunicação óptica, incluindo fibra monomodo [29], fibra multimodo [30], fibra óptica de plástico [31], redes ópticas passivas (*Passive Optical Network – PON*) [32], e sistemas de comunicação óptica sem fio (*Wireless Optical Communication – WOC*) [33].

Para produzir um sinal óptico OFDM, é necessário o uso de um conversor digital/analógico no transmissor que converte o sinal digital OFDM em um sinal analógico para ser modulado no domínio óptico, e um conversor analógico/digital no receptor que tem a função

de prover um receptor digital OFDM, por meio da conversão de um sinal elétrico OFDM analógico para o domínio digital e prepará-lo para o processador digital dos dados do receptor [34].

Para converter os sinais OFDM elétricos de valores complexos em dados no domínio óptico, o sinal é convertido eletricamente usando uma portadora de frequência intermediária para modular este sinal utilizando-se um misturador complexo IQ no domínio elétrico. Posteriormente, o sinal OFDM elétrico é convertido para o domínio óptico usando um modulador de amplitude. Outra forma, é utilizar um modulador complexo IQ e/o (eletro-óptico) que pode ser conduzido diretamente pelo sinal OFDM elétrico e, assim, convertido para o domínio óptico [21].

Considerando as técnicas de recepção óptica, existem várias classificações para descrever diferentes sistemas O-OFDM. Neste contexto podem ser citadas duas abordagens principais baseadas na tecnologia de detecção de sinal, descritas como OFDM Óptico de Detecção Coerente (*Coherent Optical OFDM – CO-OFDM*), que envolve a modulação no domínio óptico e OFDM Óptico de Detecção Direta (*Direct Detection Optical OFDM – DDO-OFDM*), que envolve a modulação da intensidade óptica [14]. A CO-OFDM apresenta melhor desempenho na sensibilidade do receptor, eficiência espectral e robustez contra a dispersão de polarização, mas requer uma maior complexidade no projeto do transceptor [35].

2.4 – Redes Ópticas Elásticas

Várias pesquisas afirmam que o limite de capacidade de transmissão das redes ópticas baseadas em WDM está muito próximo de ser atingido, tornando os problemas desta rede cada vez mais significativos. Devido a este motivo, está sendo desenvolvida uma nova rede óptica, denominada elástica (*Slice*), que supra todos os requisitos para o tráfego futuro. As redes ópticas elásticas terão canais com capacidade de transporte de 400 Gbits/s, 1 Tbits/s e demanda por taxas maiores, com a necessidade de larguras de banda distintas, espaçamento de canal reduzido, eficiência espectral e rede dinâmica [36].

Utilizando tecnologias de transmissão OFDM como base, os pesquisadores propuseram uma nova arquitetura de rede, ou seja, uma rede com o espectro formado por caminhos ópticos elásticos (*Slice*) [37] [10]. Na arquitetura *Slice*, os espectros de sinais OFDM utilizados são flexíveis e divididos em faixas de frequência contíguas arbitrárias, transportando tráfego com taxas de *bits* também arbitrárias, podendo adaptar-se à demanda de tráfego da camada superior [4].

Nas redes ópticas elásticas, se a demanda de tráfego a ser transmitida por um nó for menor que a capacidade do espectro alocado, utiliza-se OFDM para dividir este espectro em diversas subportadoras com tamanhos menores, para assim alocar apenas a quantidade necessária de subportadoras para a demanda, podendo as restantes ser alocadas para outra demanda [10].

As arquiteturas de rede WDM atuais apresentam granularidade grosseira e largura de banda fixa. Na Figura 2.9 são mostradas as principais diferenças na utilização do espectro entre as arquiteturas WDM e *Slice*. Na arquitetura WDM, cada canal ocupa a mesma largura

de espectro transmitido, independentemente da taxa de *bits*, do serviço ou da distância da transmissão. Entretanto, cada taxa de *bits* tem um transponder particular que uma vez implantado não pode ser reconfigurado. Essas limitações restringem a alocação de banda flexível e a utilização eficaz do espectro. Além disso, é possível transmitir taxas de bits de 100 Gbits/s dentro de uma largura de banda de canal de 50 GHz, enquanto que taxas de bits acima de 100 Gbits/s não podem ser acomodadas no espaçamento de canal de 50 GHz para a transmissão de longo alcance, devido ao aumento das exigências de SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) para os formatos de modulação de ordem superior [38]. Portanto, a transmissão óptica e as tecnologias de rede estão se movendo em uma direção mais elástica e reconfigurável. A flexibilidade, a adaptação e a agregação de serviço são introduzidas no domínio óptico. A granularidade fina pode ser atribuída dinamicamente, de acordo com a condição do enlace e os requisitos de qualidade de serviço [15].

A transição da arquitetura de rede fixa para a rede flexível é uma tendência para a futura rede de transporte óptico. Uma vez que os transceptores e comutadores tornam-se flexíveis, toda uma nova rede de transporte óptico elástico com alocação de banda ágil e utilização eficaz do espectro nasce [39].

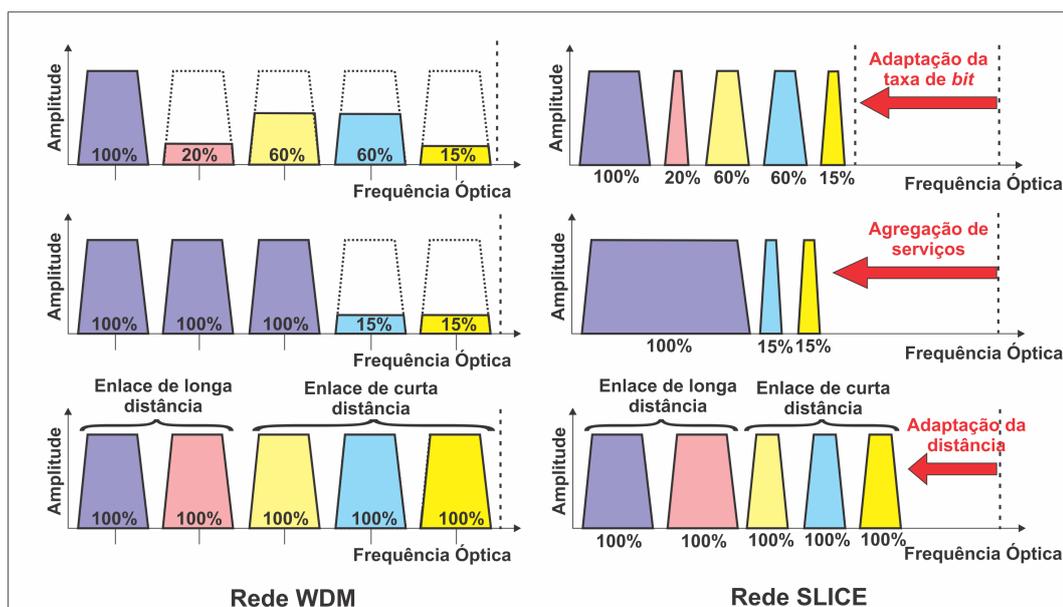


Figura 2.9 – Utilização do espectro nas arquiteturas de rede WDM e *Slice*. Adaptado [15].

2.4.1 – Arquitetura de Redes Ópticas Elásticas Baseada em OFDM

A arquitetura de rede óptica elástica baseada em OFDM utiliza comutadores ópticos (*Wavelength Cross Connectors – WXC*s) no núcleo da rede, ambos independentes de largura de banda, e transponders de largura de banda variável (*Bandwidth Variable Transponder – BVT*) baseados, por exemplo, em OFDM na borda da rede. Um modelo básico da arquitetura pode ser observado na Figura 2.10. O BVT aloca apenas espectro suficiente (subportadoras) para acomodar o tráfego de subcomprimento de onda [10]. Vários canais OFDM podem ser fundidos para formar um super-canal, multiplicando a capacidade de transporte de um canal OFDM

individual sem a utilização do intervalo de guarda entre os canais [39]. Como pode ser observado na Figura 2.11, cada nó WXC no caminho óptico aloca uma conexão cruzada, com o espectro de largura de banda adequada para criar um percurso óptico fim-a-fim de tamanho apropriado. Quando o tráfego aumenta, o transmissor pode aumentar a capacidade de transmissão, e cada WXC na rota expande a janela de comutação, permitindo, assim, os caminhos ópticos com taxa de dados e largura de banda variáveis [14].

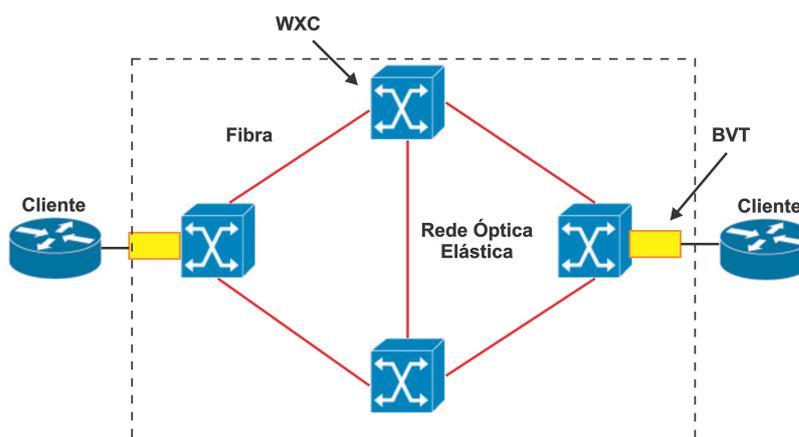


Figura 2.10 – Arquitetura de uma rede óptica elástica. Extraído de [13].

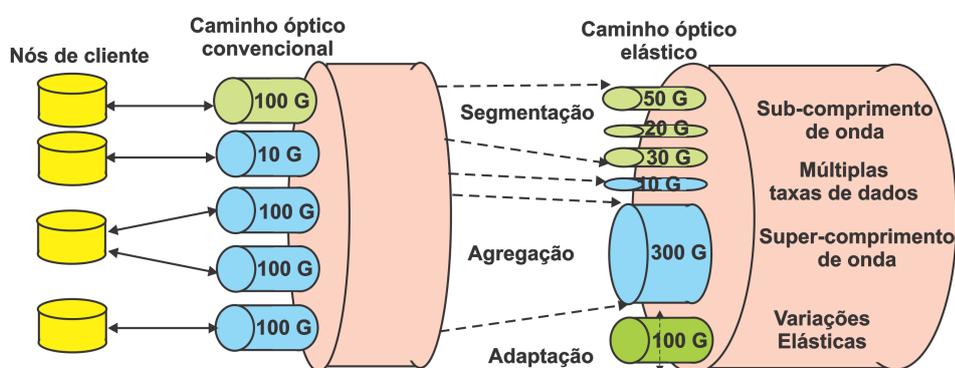


Figura 2.11 – Caminho óptico convencional e o caminho óptico elástico. Adaptado de [14] [40].

O espectro de grade flexível necessita de outras tecnologias de grande importância em nível de *hardware* para a evolução das redes ópticas, tais como, transceptores flexíveis, que ainda estão em fase inicial de desenvolvimento. Um super-canal com subportadoras de fase sincronizada é considerado como a solução mais adequada para grades flexíveis que possam suportar taxas acima de 100Gbits/s. O comutador de espectros seletivos (*Spectrum Selective Switching* – SSS) constitui um elemento principal para o advento da grade flexível. A chave para um multiplexador reconfigurável óptico (*Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer* – ROADM) flexível é a capacidade de controlar independentemente a frequência central e a largura de banda do canal do SSS [39]. A próxima geração de ROADM visa uma arquitetura de rede

totalmente óptica com serviços de retirada e inclusão de subportadoras para qualquer direção e sem contenção, referido na literatura como *Colorless Directionless Contentionless* (CDC), que suporte taxas superiores a 100Gbits/s, e o SSS precisa atender a essas novas exigências dos enlaces ópticos [15].

Os desafios técnicos da rede de fibra óptica flexível atraíram considerável atenção, sendo amplamente discutidos desde 2008. Em 2011, o padrão ITU-T G.694.1 foi revisado com a introdução de grade flexível, padrões relevantes, tais como o G.872 estão sendo revistos. A partir de 2011, a *Internet Engineering Task Force* (IETF) começou a investigar a estrutura da rede de espectro flexível e os protocolos de controle [15].

No nível do nó, novos BVTs e WXCs de largura de banda variável precisam ser desenvolvidos. No nível da rede, a alocação de espectro flexível, os algoritmos de roteamento, as abordagens de agregação de tráfego, as estratégias de sobrevivência, a virtualização de rede, a eficiência energética e a tecnologia de plano de controle precisam ser estudados. As tecnologias que precisam ser desenvolvidas em nível de nó estão fora do escopo deste trabalho, que tem como ênfase o desenvolvimento das tecnologias em nível de rede, especificamente do que trata o problema de Roteamento e Alocação de Espectro (RSA) em redes ópticas elásticas, que será discutido na próxima seção.

2.5 – Roteamento e Alocação de Espectro em Redes Ópticas Elásticas

Similar ao problema de roteamento e alocação de comprimentos de onda (RWA) em redes WDM, nas redes *Slice* existe o problema de roteamento e alocação de espectro (RSA) [41]. No RSA, é alocado um espectro (ou conjunto de subportadoras) para atender a demanda de tráfego da rede. O problema RSA é mais desafiador do que o problema RWA. Primeiro, porque a subportadora alocada deve ter continuidade, isto é, ser a mesma em todos os enlaces da rota. Segundo, as subportadoras de um mesmo caminho óptico de tamanho variável (conjunto de subportadoras) devem ser consecutivas. Além disso, a filtragem no receptor requer que os caminhos ópticos que compartilhem enlaces físicos sejam separados por uma banda de guarda [42].

Recentemente, há um grande número de trabalhos de pesquisa de soluções para o problema RSA de redes ópticas elásticas sob ambas as situações de tráfego, estático e dinâmico, incluindo considerações de tecnologia de modulação de distância adaptativa. Devido à utilização não uniforme do espectro, algumas restrições podem existir, deixando o espectro fragmentado em conexões OFDM. Portanto, políticas de alocação de espectro para minimizar a fragmentação foram propostas, e algoritmos de desfragmentação de espectro para reconfigurar a rede foram estudados [43].

2.5.1 – RSA Estático

No problema RSA estático, a fase de planejamento de rede é realizada *off-line*. Uma matriz de tráfego a priori é dada em termos da capacidade necessária para alocação de recursos e para o roteamento. O requisito principal é a capacidade de conexão para um certo número de *slots* de subportadora, com base na capacidade de cada subportadora [14].

O problema RSA estático é formulado como uma Programação Linear Inteira (PLI), que retorna a melhor solução por meio de uma combinação de roteamento e alocação de espectro [44]. O objetivo da PLI é minimizar o espectro utilizado, com as restrições de continuidade de espectro ao longo do caminho e a alocação de subportadoras contígua para cada conexão [14]. Para reduzir a complexidade, o problema RSA pode ser decomposto nos subproblemas de roteamento e alocação de espectro, e ser tratado separadamente e sequencialmente. A formulação PLI sequencial (R + SA) no trabalho de Christodoulopoulos [44], é resolvido primeiro o caminho ótimo e depois é realizada a alocação do espectro, que emprega as restrições de continuidade de espectro ao longo do caminho e a ausência de sobreposição entre as diferentes conexões. No entanto, a PLI sequencial pode encontrar soluções ótimas ou quase ideais para pequenas redes. No entanto, não garante uma solução ótima para o problema RSA [14].

2.5.2 – RSA Dinâmico

Sob um cenário de tráfego dinâmico, o problema RSA deve ser utilizado de forma particionada em abordagens de roteamento e alocação de espectro com resolução de forma sequencial. No roteamento, uma das formas é pré-calcular os K caminhos mais curtos que serão utilizados na seleção da rota. Após o roteamento, a alocação do espectro pode ser realizadas com heurísticas. As mais utilizadas na literatura são a *First-Fit* ou *Random* [44].

A política geral para alocar subportadoras de tráfego dinâmico variando no tempo é proposta em [45]. Dois tipos de subportadoras são definidos por uma conexão: um tipo faz a alocação de subportadoras para a conexão para fornecer serviço garantido, o outro tipo faz a reserva de subportadoras que poderiam ser afetadas quando o tráfego de serviço excede a capacidade alocada, sendo liberadas quando o tráfego diminui.

Em redes ópticas elásticas dinâmicas, a configuração e a liberação da conexão podem levar à fragmentação do espectro em toda a rede, separando o espectro disponível em pequenas bandas de espectro não contíguas. Este problema irá aumentar os bloqueios de solicitações de conexão. Além disso, pelo motivo do tráfego da rede evoluir com o tempo, o roteamento e a alocação do espectro podem não ser ideais em termos de utilização do espectro. Portanto, seria ideal que os operadores de rede reconfigurassem os caminhos ópticos e a alocação do espectro periodicamente, o que é referido como desfragmentação rede. A desfragmentação em uma rede óptica elástica requer que o caminho óptico seja totalmente reconfigurado [14].

Uma vez que a desfragmentação seja realizada em uma rede *online*, o requisito fundamental é que ela não deve ter nenhum impacto sobre os serviços existentes. O algoritmo

de desfragmentação também deve dar uma sequência de transição para migrar as conexões e minimizar o número de queda de conexão para reduzir a interrupção do serviço. Além disso, mais pesquisas são necessárias para explorar as condições de acionamento da operação de desfragmentação, incorporando métricas como taxa de bloqueio, utilização de recursos e capacidade da rede [44].

2.5.3 – Representação do Espectro

A Figura 2.12 mostra três representações de espectro adotadas pela literatura: grade, mini-grade e sem grade. A representação utilizando grade tem espaçamento uniforme do espectro entre os canais vizinhos; já a representação sem grade aloca arbitrariamente o espectro para cada caminho óptico [46]. Para dois caminhos ópticos o espectro óptico atribuído é apenas o suficiente para cada caminho óptico. Essa é a maneira mais eficiente em termos de utilização do espectro, em que duas portadoras ópticas vizinhas usam o espaço suficiente apenas para acomodar a largura de banda exigida pelos dois caminhos ópticos além de exigirem uma banda de guarda entre estes dois caminhos [47]. A representação mini-grade é um caso intermediário, requer que o espaço alocado do espectro de cada caminho óptico siga um determinado conjunto de frequências discretas fixas. A representação mini-grade é significativa devido à capacidade de componentes ópticos de ajuste limitado [46].

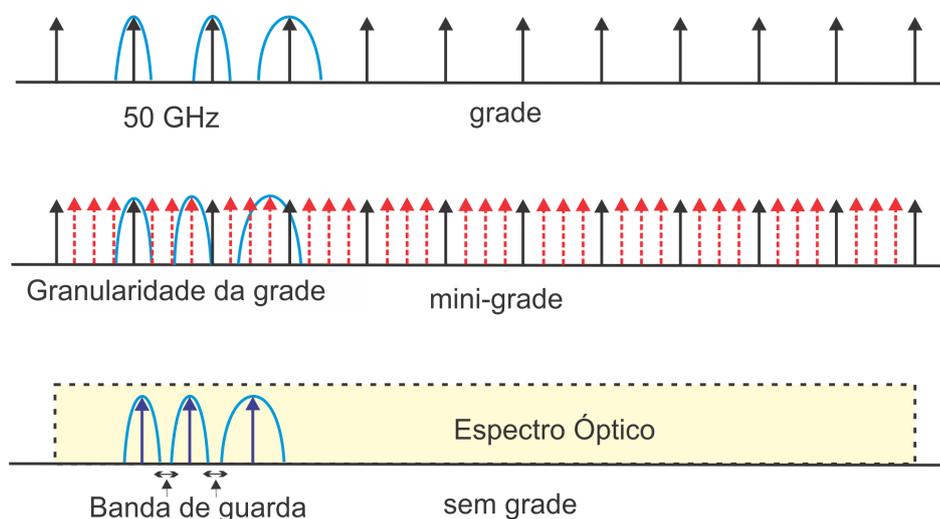


Figura 2.12 – Representações do espectro em redes ópticas: grade, mini-grade e sem grade. Adaptado de [46].

A maioria dos trabalhos emprega um método de representação do espectro baseado em *slot*, utilizando *slots* discretos, por exemplo, subportadoras ou mini-grades, para representar os recursos do espectro óptico [37]. Os componentes ópticos reais limitam ajustes para resoluções e uma rede de mini-grade suficientemente fina pode alcançar quase o mesmo desempenho que o de uma rede ideal sem grade [46]. A largura do *slot* ideal é o maior divisor comum das larguras espectrais de todos os sinais. Todos esses trabalhos destacaram a importância de uma

largura fina de *slot* [42]. No entanto, existe um compromisso entre o tempo de processamento devido a complexidade computacional, que depende do número de *slots*, e da utilização eficiente do espectro. A largura mais fina de *slot* resulta em uma maior complexidade, mas melhora a eficiência do espectro. Com o contínuo desenvolvimento de dispositivos ópticos, os ajustes finos de resolução serão mais utilizados na evolução de redes de grade flexível [47].

Existem dois candidatos para a especificação do padrão de *slot* de espectro flexível, como é mostrado na Figura 2.13. Abordagem ITU-T de grade de *slot* único, que atribui a frequência central em uma grade com granularidade de 12,5 GHz para o *slot* do espectro, e usa o mesmo plano de numeração de frequência ITU-T para atribuir os números aos *slots*, garantindo, assim, a compatibilidade com o atual padrão de grade ITU-T, e a abordagem ITU-T de grade de *slot* unilateral, que divide a grade em duas faixas espectrais de 6,25 GHz, introduzindo, assim, um novo sistema de numeração de *slot* [40].

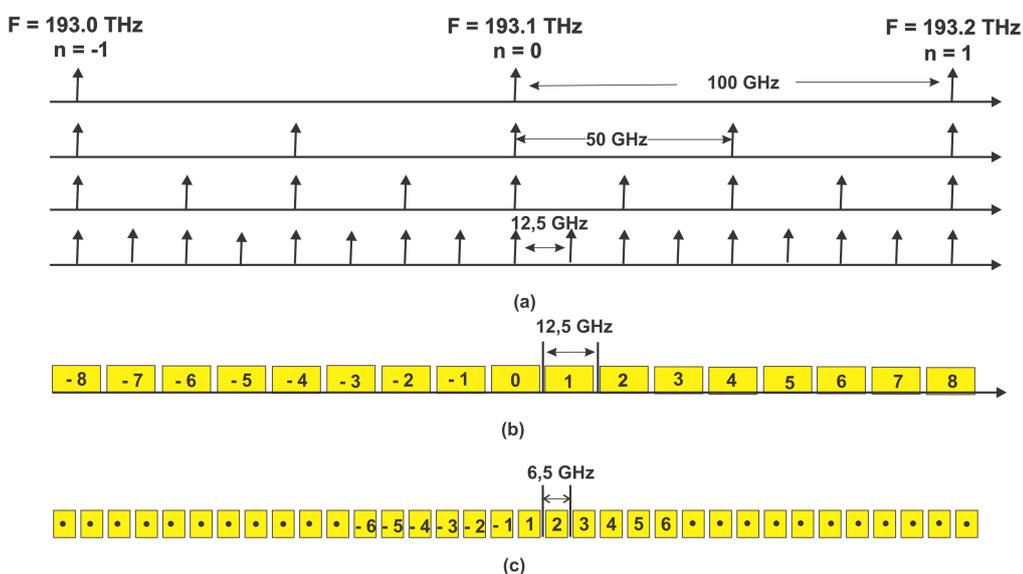


Figura 2.13 – Esquemas de especificação do recurso espectral: a) grade atual do espectro de frequência do padrão ITU-T WDM; b) grade de *slot* único; c) grade de *slot* unilateral. Adaptado de [40].

2.5.4 – Problema RSA

Nesta seção é apresentada a formulação matemática de um modelo de Programação Linear Inteira para o problema completo de RSA dinâmico [4], que integra os subproblemas de roteamento e atribuição de espectro, levando em consideração a restrição de continuidade de espectro e a restrição de rota única, que garante que o tráfego é encaminhado em um único caminho sem *loops* [4]. Nesta PLI considera-se os seguintes parâmetros:

- $G(N, E)$ – topologia de rede,
- i e j – denotam, origem e destino de um caminho óptico, respectivamente,

- N_{ij} – quantidade de nós da rede, em que a origem $i \in N$ e o destino $j \in N$,
- E_{ij} – Enlace unidirecional com $i \neq j$,
- B – largura de banda da demanda.

O objetivo principal é maximizar a quantidade de aceitação de requisições da demanda de tráfego, minimizando assim a probabilidade de bloqueio dessas requisições. Pode-se escrever o objetivo da seguinte forma [4]:

$$\max \left[\alpha A^{sd} - \sum_{ij \in E} (r_{ij} D_{ij}) \right], \quad \alpha > \sum_{ij \in E} D_{ij}. \quad (2.1)$$

Em que:

- A^{sd} – denota a aceitação do tráfego, em que s é o nó de origem e d é o nó de destino. Tem valor binário, é igual a 1 se a demanda puder ser aceita,
- r_{ij} – variáveis de roteamento, com $i \neq j$. Binário, é igual a 1 se a rota escolhida é encaminhado no enlace E_{ij} ,
- D_{ij} – Distância do enlace.

A largura de banda da demanda é definida por:

$$B = f_b - f_a - bg \quad (2.2)$$

Em que:

- f_a e f_b – Frequência de início e fim, respectivamente, da faixa de espectro contíguo alocado para a demanda de tráfego,
- bg – banda de guarda.

A restrição de rota simples é determinada por:

$$\sum_j r_{ij} \leq A^{sd}, \quad \forall i \in N. \quad (2.3)$$

Nessa restrição, se para cada nó i a rota possa ser encontrada, então ($A^{sd} = 1$). Neste caso há apenas uma rota de saída na variável r_{ij} que possa ser selecionada. Caso contrário ($A^{sd} = 0$), em que todas as variáveis de rotas são setadas em zero.

A restrição de continuidade de espectro garante que somente um segmento disponível será selecionado em cada enlace ao longo de toda rota, sendo definida por:

$$\sum_{k=1}^{K_{ij}} \pi_{ij}^k = r_{ij}, \quad \forall ij \in E. \quad (2.4)$$

Em que:

- K_{ij} – Segmentos disponíveis no espectro. O espectro de S_{ij} consiste em K_{ij} segmentos disponíveis,
- $S_{ij}^k = (a_{ij}^k, b_{ij}^k)$ – Segmento do espectro disponível de ordem k ,
- π_{ij}^k – Segmento de espectro. Binário, é igual a 1 se o enlace for utilizado.

Para não haver sobreposição do espectro considera-se as seguintes regras:

$$\begin{cases} f_b - b_{ij}^k \leq B^{total} \cdot (2 - r_{ij} - \pi_{ij}^k) \\ a_{ij}^k - f_a \leq B^{total} \cdot (2 - r_{ij} - \pi_{ij}^k) \end{cases} \quad \forall ij \in E, \forall k. \quad (2.5)$$

$$B^{total} = f^{inicial} - f^{final}. \quad (2.6)$$

2.5.5 – Alocação de Espectro

Nas redes RSA, a restrição de continuidade de comprimento de onda das redes WDM é transformada em uma restrição de continuidade de espectro. A conexão exige uma capacidade que deve ser satisfeita por meio da alocação de uma faixa de *slots* contíguo e que essa mesma faixa de espectro contíguo tem que ser atribuída em todos os enlaces da origem até o destino [44].

Assim como no roteamento, a alocação de espectro pode ser realizada de maneira fixa ou dinâmica. Na alocação fixa, o conjunto de *slots* contíguos é pré-definido antes da requisição do caminho óptico. Na alocação dinâmica, o conjunto *slots* contíguos disponíveis é verificado no momento da requisição da conexão de acordo com a heurística adotada pelo algoritmo RSA e o estado atual da rede. As principais heurísticas adaptativas encontradas na literatura são [4]:

- ▀ *First-Fit* – FF: Neste esquema, todos os *slots* de espectro estão contados. Esta heurística procura os *slots* consecutivos com a quantidade necessária para alocar a taxa de dados da requisição, na ordem de índice de *slots* de espectro ascendente, e seleciona a primeira faixa de *slots* encontrada para a solicitação da conexão. Este algoritmo é semelhante à heurística *First-Fit* para atribuição de comprimento de onda em redes WDM [48];

- Aleatório (*Random – R*): Este algoritmo inicialmente procura selecionar a faixa de *slots* contíguos disponíveis para a rota requisitada dentre todas as faixas disponíveis de forma aleatória (geralmente com uma probabilidade uniforme) [44];
- Menor *Slot* de Partida (*Lowest Starting Slot – LSS*): Esta heurística encontra todos os espaços disponíveis que possam alocar a demanda, entre eles, procura o espaço que utilizará menos *slots* consecutivos e aloca esta demanda com a menor quantidade de *slots* possíveis. Esta heurística suporta preenchimento de vazios, no sentido de que as faixas com maior quantidade de *slots* fiquem disponíveis para demandas com maiores capacidades [44].

A heurística *First-Fit* é rápida e simples, exigindo menos processamento, enquanto que a heurística LSS pode ter uma utilização de espectro mais eficiente por causa de sua capacidade de preenchimento de vazios, mas com um custo computacional alto [48].

Para lidar com as requisições de conexão estática durante a fase de planejamento de rede, a ordem em que os algoritmos heurísticos tratam a demanda de requisição individual acima referida é de fundamental importância, já que diferentes ordenamentos podem resultar na utilização de espectros de forma diferente. Várias políticas de ordenação são propostas em [44]:

- Primeiro com mais subportadoras (*Most-subcarriers-first*): ordena a conexão de forma a escolher primeiro à conexão com a maior largura de banda;
- Caminho mais longo primeiro (*Longest-path-first*): ordena as demandas de conexão na ordem do número de conexões de seus caminhos mais curtos de forma descendente, e atende a conexão que tem o caminho mais longo primeiro;
- *Simulated Annealing (SA)*: é um algoritmo de otimização utilizado para ordenar as requisições. Este algoritmo encontra uma ordenação quase ótima com base nas políticas (1) e (2) para proporcionar boas soluções de alocação de espectro.

2.5.6 – Roteamento

Roteamento em uma rede de comunicação refere-se à tarefa de propagação de uma mensagem a partir da sua origem para o seu destino [49]. O problema de roteamento dinâmico e alocação de recursos é um importante fator a ser considerado no gerenciamento das redes ópticas, e é assunto que tem recebido bastante atenção pela comunidade científica [47].

Em redes ópticas, pode-se trabalhar com três abordagens de roteamento:

- Roteamento fixo - é a abordagem mais simples de roteamento de uma conexão, por meio da qual é escolhida sempre a mesma rota fixa para um determinado par origem-destino. Esse tipo de algoritmo de roteamento é executado *off-line* e tem como principal vantagem sua simplicidade. Entretanto, devido a uma grande sensibilidade a falhas na rede, se a escolha

do caminho óptico sobre a rota pré-determinada estiver indisponível, a probabilidade de bloqueio de rede pode se tornar considerável, tanto para casos estáticos quanto para dinâmicos. Um exemplo desse tipo de abordagem é o roteamento fixo pelo caminho mais curto que usa algoritmos padrões de caminho mais curto, como o algoritmo de *Dijkstra* ou o de *Bellman-Ford* [50];

- ▣ Roteamento fixo-alternado - essa abordagem para roteamento considera múltiplas rotas. Neste caso, cada nó na rede tem a necessidade de manter uma tabela de roteamento que contém uma lista ordenada de um número de rotas fixas para cada nó de destino. Estas vias podem incluir várias rotas de caminho mais curto, ficando as rotas com menor custo como as primeiras da lista. Caso a primeira não esteja disponível, a segunda rota mais curta é então utilizada e assim por diante até conseguir uma rota. Caso não seja encontrado um caminho disponível, a requisição é bloqueada. Comparado com o roteamento fixo, o roteamento fixo-alternado tem uma probabilidade de bloqueio menor, pois provê um alto grau de tolerância a falhas nos enlaces. O termo "rotas alternativas" também é utilizado para descrever todas as rotas (incluindo a via primária) a partir de um nó de origem para um nó de destino [50];
- ▣ Roteamento adaptativo - neste tipo de roteamento, a rota de um nó de origem para um nó de destino é escolhida de forma dinâmica, de acordo com o estado da rede. Então, algoritmos de roteamento adaptativo são executados *on-line*. O estado da rede é determinado pelo conjunto de todas as conexões que estão atualmente em andamento. Nessa abordagem de roteamento, uma requisição é bloqueada quando não houver mais rotas e/ou espectro disponíveis para o estabelecimento do caminho óptico. No roteamento adaptativo, a probabilidade de bloqueio é a menor dos demais métodos mencionados anteriormente. O roteamento adaptativo requer um amplo apoio dos protocolos de controle e gestão para atualizar de forma contínua as tabelas de roteamento nos nós [50]. Várias abordagens para determinar a rota podem ser utilizadas neste tipo de roteamento, entre as principais, pode ser citado o roteamento pelo caminho menos congestionado (LCP - *Least-Congested Path*). Uma desvantagem do LCP é sua complexidade computacional. Na seleção do caminho menos congestionados, todos os enlaces de todas as rotas candidatas, se existir, devem ser examinados. Dependendo da topologia da rede, tal busca pode consumir bastante tempo no processo de roteamento. Outra abordagem é a de menor custo. Nesta abordagem, cada enlace não utilizado na rede tem um custo unitário $c(v_i, v_j) = 1$, e cada enlace utilizado tem um custo $c(v_i, v_j) = C$, no caso de possuir a capacidade de conversão de comprimento de onda e $c(v_i, v_j) = \infty$, caso não possua. Quando uma conexão óptica é solicitada, a rota de menor custo no estado atual da rede é determinada entre o par de nós origem e destino [51].

O Roteamento, de um modo geral, utiliza algoritmos como o de *Dijkstra*, na qual são encontradas as rotas de menor custo utilizando algum critério pré-estabelecido. Os critérios de

custo geralmente adotados são o número de enlaces da rota, o atraso de propagação, ou distância entre os nós de origem e destino [50].

Em uma rede óptica elástica com restrição de continuidade de espectro, o processo de determinação de uma rota é importante, pois a escolha da rota influencia a eficiência na utilização de recursos e, conseqüentemente, o desempenho da rede. Nesse processo, geralmente é levado em consideração apenas um critério. A proposta deste trabalho é definir uma função custo para roteamento, tendo como foco principal a utilização de vários critérios. O uso de critérios adicionais, desde que adequadamente combinados, pode levar a uma melhoria no desempenho da rede [7]. São definidos critérios levando em consideração a importância em problemas de roteamento e a viabilidade na coleta de dados para o cálculo da função custo, com o objetivo de otimizar o problema de roteamento em redes ópticas elásticas.

2.5.7 – Roteamento com abordagem multicritério

Um algoritmo de roteamento seleciona a rota do nó de origem ao nó de destino. Alguns algoritmos utilizados para escolha dessa rota para atender a uma requisição de conexão utiliza apenas um critério, comumente o número de enlaces da rota, ou atraso de propagação [52] [7]. Tal algoritmo de roteamento pode ser obrigado a cumprir um conjunto diversificado e muitas vezes conflitante de requisitos de desempenho. Isso faz com que o roteamento seja um exemplo de um problema de otimização multicritério, que utiliza vários critérios para a decisão da melhor rota [53] [7].

Muitos critérios poderiam ser utilizados na decisão da melhor rota. A utilização de critérios adicionais, especialmente dos que variam em função do estado da rede, pode levar a uma escolha mais apropriada, e, a longo prazo, melhorar o desempenho da rede, possibilitando o atendimento de mais requisições de conexão com a mesma quantidade de recursos [7] [52]. Mas isso depende do modo como os critérios são combinados. É possível elaborar uma função que relacione os critérios adotados e usá-la para efetuar a escolha da rota. Por exemplo, pode-se considerar uma combinação linear, em que as variáveis representam os critérios, e os coeficientes indicam a relevância de cada critério para a escolha. Nesse caso, o problema reside em atribuir adequadamente os coeficientes para cada rede [53] [7] [52].

No contexto de tomada de decisão utilizando múltiplos critérios, os métodos e os procedimentos por meio dos quais os critérios possam ser formalmente incorporados em um processo analítico, inserem-se em um campo geral de conhecimento, originalmente denominado *Multiple Criteria Decision Making* (MCDM). Este campo subdivide-se em duas classes distintas. Uma é a análise multiatributo (*Multiattribute Decision Analysis*) e a outra é a otimização (ou programação matemática) multicritério ou multiobjetivo (*Multiple Objective Mathematical Programming*) [54] [55]. A análise multicritério é, na maior parte das vezes, aplicada a problemas com um pequeno número de alternativas explicitamente conhecidas. Por outro lado, a programação matemática multiobjetivo é aplicada a problemas em que as alternativas admissíveis

são implicitamente definidas por um conjunto de restrições e, geralmente, sendo em número demasiado elevado para que todas possam ser analisadas individualmente [55].

Neste trabalho, é proposta uma nova função custo para roteamento em redes ópticas elásticas, utilizando uma abordagem multicritério baseada na duas classes de tomada de decisão citadas anteriormente. Na classe denominada de análise multicritério, é utilizada a Teoria da Utilidade Multiatributo, método descrito no Capítulo 3. Na classe denominada de otimização multicritério, são utilizada as regras da lógica *Fuzzy*, descrita no Capítulo 4.

Teoria da Utilidade Multiatributo

Para representar as preferências de um indivíduo em relação aos elementos de um conjunto, foi desenvolvida a Teoria da Utilidade, a qual utiliza números reais por meio de uma expressão quantitativa do valor de satisfação associado a um resultado para representá-los. Quando o problema para definir essa preferência envolve múltiplos critérios, é utilizada a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT). Esta teoria segue os axiomas de que todas as alternativas são comparáveis e que existe transitividade e indiferença na relação de preferência entre as alternativas [56].

3.1 – Apoio Multicritério à Decisão

As abordagens de análise multicritério tiveram seu surgimento nas décadas de 1970 e 1980, em substituição aos modelos de pesquisa operacional, para a resolução de problemas logísticos-militares. A pesquisa operacional faz parte de um processo de aperfeiçoamento matemático para solução de problemas que envolve decisões complexas, no qual o agente de decisão faz uso de múltiplos critérios para auxiliá-lo no processo decisório. Os estudos de problemas de decisão que estão inseridos em um ambiente complexo têm sido objeto de preocupação de pesquisadores sobre o assunto. Neste contexto, são destacados alguns métodos aplicados aos problemas de decisão utilizando múltiplos critérios, surgindo assim o campo de estudo: Apoio Multicritério à Decisão [57].

O Apoio Multicritério à Decisão (AMD) tem como objetivo estabelecer uma relação de preferências entre as alternativas escolhidas para a tomada de decisão sob a influência de vários critérios. Os métodos do AMD auxiliam o processo de tomada de decisão, ajudando o agente de decisão nos julgamentos de valores das suas preferências [56].

Diversas áreas de estudo apresentam problemas complexos de tomada de decisão, nas quais os pesquisadores tentam resolvê-los apoiando-se em abstrações, heurísticas e raciocínios dedutivos, com o objetivo de orientar e validar as suas escolhas [58]. Estes problemas de tomada de decisão podem apresentar uma ou mais das seguintes características [57]:

- ▣ Os critérios para resolução do problema são conflitantes entre si;

- ▣ Os critérios podem não estar claramente definidos, e as consequências da escolha de uma alternativa em relação a pelo menos um critério, não são devidamente compreendidas;
- ▣ Os critérios podem estar interligados, de forma que um critério pode refletir nos demais;
- ▣ As restrições dos problemas não estão bem definidas, podendo existir dúvidas em definir o que é critério e o que é restrição;
- ▣ Podem existir critérios quantificáveis, e critérios que os seus valores são definidos por meio de juízos de valor efetuados sobre uma escala;
- ▣ Dependendo da natureza dos critérios, a escala pode ser definida em cardinal, verbal ou ordinal;

Em resumo, a abordagem AMD pode ser caracterizada como um conjunto de métodos que buscam tornar claro um problema, no qual as alternativas são avaliadas por múltiplos critérios, os quais na maioria dos casos são conflitantes. Esse tipo de abordagem pode não apresentar uma solução ideal para uma tomada de decisão para a solução do problema, mas dependendo da escala de valores e dos métodos utilizados, pode ser encontrada a solução mais coerente [57]. Existem vários métodos desenvolvidos que se destacam tendo como objetivo uma abordagem para resolução de problemas utilizando múltiplos critérios. Dentre eles, destaca-se uma teoria desenvolvida pela escola americana, definida como Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) [58].

A escolha do método vai depender de como o problema será analisado, qual contexto deve ser considerado e qual é a estrutura de preferência do agente de decisão. Os aspectos ligados às preferências do agente de decisão são geralmente considerados para a escolha de um método de apoio à decisão. Em determinadas circunstâncias, simplicidade e facilidade de operacionalização podem ser fatores cruciais para solucionar o problema. Muitas vezes, a falta de intimidade com outras metodologias implica ao agente de decisão a escolha de um determinado método, o qual nem sempre é o mais apropriado para a situação [57].

3.2 – Axiomas da Teoria da Utilidade

Os axiomas da teoria da utilidade são a base para todo o processo operacional responsável pela definição da função utilidade, e conseqüentemente, para a definição da função custo que será utilizada para a decisão de escolha da melhor rota, principal objetivo deste trabalho. A violação de quaisquer desses axiomas culmina em uma tomada de decisão irracional [59] [60]. Os axiomas da Teoria da Utilidade são:

- ▣ **Ordenabilidade:** Dadas duas alternativas quaisquer, deve-se preferir uma a outra ou então classificar as duas como igualmente preferíveis. Ou seja, não se pode evitar a decisão [59].

$$(A \succ B) \vee (B \succ A) \vee (A \sim B). \quad (3.1)$$

- ▣ **Transitividade:** Dadas três alternativas quaisquer, se a preferência for por A em vez de B e B em vez de C , então deve-se preferir A em vez de C [59].

$$(A \succ B) \wedge (B \succ C) \Rightarrow (A \succ C). \quad (3.2)$$

- ▣ **Continuidade:** Se a alternativa B estiver entre A e C na preferência, então haverá alguma probabilidade P de que a decisão seja feita indiferentemente entre escolher B por garantia ou escolher A com probabilidade $P(A)$ ou C com probabilidade $1 - P(A)$ [59].

$$A \succ B \succ C \Rightarrow B \sim P(A) \sim 1 - P(A). \quad (3.3)$$

- ▣ **Substitutibilidade:** Se não existe uma preferência na decisão entre duas alternativas A e B , então, deve-se escolher sempre entre A e B , nunca uma outra alternativa C [59].

$$A \sim B \Rightarrow A \wedge B. \quad (3.4)$$

- ▣ **monotonicidade:** Se duas alternativas A e B têm os mesmos resultados, e se existe uma preferência por A , então, deve-se ter a preferência pela alternativa que tem uma probabilidade $P(A)$ mais alta [59].

$$A \succ B \Rightarrow P(A) > Q(A) \leftrightarrow P(A) \succ Q(A). \quad (3.5)$$

Os axiomas da Teoria da Utilidade descrevem as preferências das alternativas na decisão, porém, como consequência desses axiomas, surgiu o teorema da existência da função utilidade, descrito a seguir [59].

- ▣ Se as preferências obedecem aos axiomas da Teoria da Utilidade, então, existe uma função de valores reais U que atua sobre as alternativas A e B , tal que $U(A) > U(B)$ se e somente se A é preferível em relação a B , e $U(A) = U(B)$ se e somente se existe uma indiferença na decisão entre A e B .

Ou seja, a cada alternativa A , é atribuído um valor $U(A)$, calculado em função dos critérios de A , que pode ser usado para ordenar as alternativas, uma vez que, se uma alternativa tem mais valor do que outra, fica obrigatoriamente à frente na ordenação, e vice-versa (1ª condição). Por outro lado, duas alternativas indiferentes terão forçosamente o mesmo valor, e vice-versa (2ª condição) [61].

3.3 – Características da MAUT

A MAUT é uma abordagem AMD que utiliza um método discreto, sendo utilizado para determinar o quanto um critério pode ter mais importância em relação a outros critérios e a partir dessa priorização dos critérios construir uma função matemática, denominada função utilidade. Neste contexto, se um determinado critério for pouco importante diante de outros critérios, ele terá um peso atribuído menor, em comparação aos pesos dos demais critérios [56]. Essa representação da importância dos critérios é definida pelo conceito de taxa de substituição ou *trade-off* [62]. Este conceito será explicado mais adiante.

A MAUT é um procedimento sistemático permitindo avaliar o valor de múltiplas alternativas simples ou complexas. Para tanto, utiliza-se uma escala comum para combinar julgamentos em mais de uma dimensão. A técnica é utilizada para avaliar alternativas utilizando mais de um critério e combinar medidas em um simples valor agregado de utilidade [63]. Para tanto, utiliza o conceito de matriz de utilidade. Essa matriz apresenta os elementos de uma decisão estruturada. Esses elementos são: alternativas, critérios para avaliação das alternativas e pesos que indicam a importância relativa do critério e da avaliação da utilidade [64].

Tabela 3.1 – Matriz Utilidade. Adaptada de [64].

Critérios	Peso	Alternativas
x_1	k_1	$U(x_1)$
x_2	k_2	$U(x_2)$
x_3	k_3	$U(x_3)$
Função Utilidade	$\sum(U(x_1, x_2, x_3))$	

3.3.1 – Escolha dos Critérios

A solução de um problema pode ser trivial, caso seja considerado que a utilização de apenas um único critério seja suficiente, mas se a decisão se basear em vários critérios, as dificuldades podem surgir, principalmente porque os critérios podem ser normalmente

conflitantes, ou seja, não é possível encontrar uma alternativa que seja melhor que as outras em todos os critérios simultaneamente [65] [60].

Definir os critérios de avaliação é um dos pontos mais importantes do processo de resolução do problema, por corresponder à identificação dos aspectos relevantes para estabelecer a preferência de uma alternativa sobre a outra. Para que os critérios escolhidos possam levar a uma decisão que seja a mais ideal ou a mais correta, é necessário levar uma série de características, então um conjunto coerente de critérios deve conter as seguintes propriedades [65] [60]:

- ▣ Análise exaustiva de todos os critérios possíveis, em que todos os pontos de vista relevantes devem ser incluídos.
- ▣ A definição dos critérios deve ser consistente. Se duas alternativas *A* e *B* tiverem valores iguais em quase todos os critérios, sendo diferente em apenas um critério, e se nesse critério a alternativa *A* é melhor do que a alternativa *B*, então *A* deve ser considerada, no geral, pelo menos tão boa quanto *B*.
- ▣ Não deve haver redundância entre os critérios.
- ▣ O número de critérios deve ser relativamente baixo, dando característica de legibilidade.

Depois de identificar uma quantidade coerente de critérios, o próximo passo é definir como esses critérios serão mensurados com suas respectivas escalas de valores. Este processo pode ser complicado quando estão envolvidos critérios associados a conceitos mais vagos, como a qualidade, o risco etc [66]. Para converter critérios em atributos mensuráveis, normalmente são utilizados indicadores numéricos, às vezes mais do que um, para representar adequadamente o conceito que se pretende avaliar, o que exige cuidado, clareza e transparência na definição dos indicadores [65].

Outra forma de mensurar os critérios, é definir categorias que correspondem a uma análise global do grau de avaliação do critério, por exemplo, ruim, razoável, bom, ótimo, excelente, em um critério associado à qualidade. É importante caracterizar de forma clara os aspectos e as situações que correspondem a cada categoria, para diminuir a subjetividade dos julgamentos [66].

Em problemas multicritério, não se pode obter uma solução ótima sem controvérsia, ou seja, sempre haverá uma solução que pode ter preferência, em relação a outra que poderá ser diferente para diferentes critérios utilizados, não se pode afirmar qual delas está correta e qual está errada, pois cada uma dará mais ou menos importância a cada um dos critérios, de acordo com os interesses e com a sua percepção global da situação [66].

3.3.2 – Definindo critérios para o problema de roteamento

Seguindo as propriedades e os axiomas da Teoria da Utilidade, os critérios definidos tiveram como objetivo otimizar o problema de roteamento em redes ópticas elásticas. Os critérios

foram escolhidos de acordo com a sua importância em problemas de roteamento, levando em consideração também a viabilidade na coleta de dados para o cálculo da função custo que será responsável por definir a melhor rota entre o nó de origem e o nó de destino que será utilizado pela requisição da conexão. Os critérios escolhidos neste trabalho são os seguintes:

1. Quantidade de enlaces na rota – (E)

O problema de roteamento dinâmico é considerado muito complexo por causa das degradações da camada física na transmissão por fibra óptica. Existem duas categorias de degradações, as degradações consideradas não lineares, que depende da potência do sinal óptico de transmissão e as degradações lineares, que estão mais ligadas à camada física óptica propriamente dita, como atenuação da fibra óptica, perda de inserção etc. As degradações não lineares são complexas e difíceis de serem caracterizadas e essas degradações aumentam em função da distância e da quantidade de enlaces que o sinal óptico transmitido pode percorrer. Por estes motivos, uma maneira de diminuir os efeitos desse tipo de degradação é minimizar a quantidade de enlaces envolvidos na propagação do sinal óptico de um nó origem para um nó destino [67].

2. Espaço disponível no espectro – (S).

O espectro de redes ópticas flexíveis é dividido em *slots*, com o objetivo principal de diminuir a disparidade entre a granularidade das demandas das redes clientes e das redes de transporte. Para isso, os recursos espectrais são divididos de forma adaptativa para atender as requisições das demandas de forma ideal, gerando canais com largura de banda variável, determinada de acordo com as necessidades dos fluxos a serem transmitidos. Quanto melhor a estratégia de alocação das requisições, maior a demanda que poderá ser atendida [68].

3.4 – Definindo a Função Custo para Roteamento Multicritério

A função custo é a função definida para tratar o problema de roteamento que incorpora a estrutura de preferência do agente de decisão em relação aos critérios: quantidade de enlaces entre origem e destino (E) e a quantidade de espectro disponível (S).

Os critérios são modelados em duas etapas [61]. A primeira etapa é aplicada sobre E e S , a fim de obter as funções utilidade unidimensionais $U(E)$ e $U(S)$, respectivamente. Em seguida, é aplicada a segunda etapa, com a finalidade de se obter a função utilidade multicritério $U(E, S)$ com a definição dos pesos de cada critério.

3.4.1 – Função Utilidade

A utilidade é uma medida que define a preferência com uma propriedade aditiva quando se deseja avaliar a utilidade para mais de um critério. Uma função utilidade associa os possíveis

níveis que uma alternativa pode assumir, com utilidades para os níveis considerados. A função utilidade pode ser cardinal ou ordinal. Na primeira, os valores indicam informações sobre a intensidade das preferências, enquanto que na segunda, é criada uma lista de classificação, em ordem crescente, das preferências [64]. A função utilidade somente pode ser utilizada em situações nas quais as probabilidades são conhecidas, ou a solução dos problemas é determinística e/ou as relações de preferências são conhecidas [64].

Para a utilidade individual de cada critério de escala linear, são atribuídos valores variando de 0 a 1, sendo o valor de utilidade 1 representativo da melhor situação e o valor de utilidade 0 representativo da pior situação [56]. Uma vez obtida a função utilidade individual de cada critério pela teoria da utilidade, as funções utilidade finais podem ser deduzidas para qualquer que seja a função probabilística sobre todos os critérios citados [69]. A seguir, são apresentadas as funções utilidade para os critérios quantidade de enlaces (E) e espaço disponível no espectro (S), obtidas conforme procedimento proposto por Keeney & Raiffa [61], [69].

3.4.2 – Função Utilidade Para o Critério (E)

Para definir a função utilidade desse critério, é utilizada a quantidade de enlaces de todas rotas possíveis entre a origem e destino da requisição. Em cada requisição de conexão, são apresentadas as alternativas de rotas candidatas, assim, analisa-se qual tem o maior número de enlaces. Esse valor é utilizado para determinar o limite superior da escala na função utilidade denotado por T_E . O limite inferior terá sempre o valor 1 (um), pois é a quantidade mínima de enlaces que uma rota pode conter e N_E representa o número de enlaces da rota candidata. Então, em cada requisição de conexão e para cada alternativa, é calculada a utilidade de acordo com a Equação 3.6:

$$U(E) = \frac{T_E - N_E}{T_E - 1}. \quad (3.6)$$

3.4.3 – Função Utilidade Para o Critério (S)

A fibra com uma janela espectral com banda total de 4.000 GHz é dividida em um mini-grade com trezentos e vinte *slots* com capacidade de 12,5 GHz, o que define o limite superior da escala, denotado por S_S . Já o limite inferior é definido com a quantidade de 3 *slots*, esse valor é considerado como a quantidade mínima de *slots* ocupados na atribuição do espectro quando a requisição de conexão é atendida, sendo 1 *slot* de dados e 2 *slots* de banda de guarda. Como cada rota pode conter mais de um enlace, e cada enlace pode conter uma quantidade diferente de *slots* livres, para definir o valor da quantidade de *slots* (Q_S), é calculada a média da quantidade de *slots* livres da grade entre os enlaces participantes da rota. Então, em cada requisição é calculada

a utilidade para cada alternativa de rota de acordo com a Equação 3.7:

$$U(S) = \frac{Q_S}{S_S - 3}. \quad (3.7)$$

3.4.4 – Função Utilidade Multicritério Aditiva

Quando se trabalha com MAUT, as preferências do agente de decisão são modeladas a fim de se obter uma função utilidade multicritério $U(E, S)$. Esta função agrega ambas utilidades unidimensionais $U(E)$ e $U(S)$. Portanto, uma função analítica é obtida para combinar todos os critérios [69].

As funções utilidade multicritério têm suas condições de independência e de preferência avaliadas, a fim de garantir que as preferências do agente de decisão estejam associadas com os axiomas básicos da teoria MAUT. As funções utilidade multicritério mais usuais são a aditiva e a multilinear. A função utilidade aditiva é justificada nos casos em que se encontra a condição de independência aditiva nas preferências do agente de decisão [61]. A função utilidade aditiva geralmente é utilizada quando o objetivo do trabalho não é monetário [56].

A função utilidade aditiva também deve ter valores variando de 0 a 1 para cada critério e a soma dos pesos k_i deve ser igual a 1. A nota final de todas as alternativas fica entre 0 e 1, seguindo o mesmo critério já descrito: 0 para a pior alternativa e 1 para a melhor alternativa possível. A escala não precisa ser exatamente linear, sendo justificada a preferência do uso da Teoria da Utilidade [56].

Na função utilidade aditiva, são definidas, primeiramente, as funções utilidade individuais $U(x_1), U(x_2), U(x_3) \dots U(x_m)$ para os m critérios, como já definidos anteriormente. Se k_1, k_2, \dots, k_m , forem os pesos para cada um dos critérios, a utilidade para cada uma das alternativas pode ser calculada [56]. Assim, a função utilidade aditiva para o problema multicritério é definida em (3.8):

$$U(E, S) = k_1 \cdot \frac{T_E - N_E}{T_E - 1} + k_2 \cdot \frac{Q_S}{S_S - 3}. \quad (3.8)$$

A seguir, serão apresentados os métodos para a atribuição dos pesos. O método escolhido por este trabalho foi o método da taxa de substituição, definida na literatura como *trade-off*, que inclui as etapas de julgamento de indiferença e o processo de cálculo dos valores dos pesos. Existem outros métodos disponíveis, que dependem do tipo do problema bem como do modelo da função utilidade utilizada [70].

3.4.5 – Definição dos Pesos para os Critérios

Em MAUT, se existir um critério que seja considerado menos importante do que os outros critérios que fazem parte do problema, para este critério será atribuído um peso inferior ao peso atribuído aos outros critérios que serão considerados de maior importância. Essa teoria permite a definição de uma função que busca agregar os valores de cada alternativa em cada critério. Isto significa que a importância relativa de cada critério pode ser obtida por meio de métodos matemáticos como, por exemplo, o método da taxa de substituição [64].

Os valores dos pesos k_i podem, de uma certa forma, ser fixados diretamente pelo agente de decisão de acordo com vários fatores como, conhecimentos técnicos, a experiência sobre o tratamento do problema e com base na importância relativa dos critérios [60]. Porém, esta não é a forma correta, pois os fatores descritos que levam o agente de decisão a fixar os pesos referem-se à sua ideia geral sobre os critérios, sem atender à gama de valores utilizadas para definir as funções de valor individuais, valores esses que podem ser modificados de forma arbitrária, podendo levar a escolhas ineficientes para a resolução do problema [61] [60].

Um dos processos corretos de escolha dos pesos consiste em duas etapas: a primeira é a obtenção de um julgamento de indiferença entre duas alternativas, a segunda é o processo de cálculo dos valores dos pesos. Uma das vantagens desse método é a sua simplicidade, na qual podem ser utilizados valores reais ou hipotéticos para representar as alternativas, de acordo com o conhecimento sobre o problema do agente de decisão [60].

Em seguida, é mostrado um exemplo de definição dos pesos utilizando o método discutido [60]. Para esse exemplo são utilizadas três alternativas, representando as três rotas candidatas, e os critérios escolhidos por este trabalho. Os valores definidos foram os utilizados para o cálculo dos pesos com a carga de tráfego média. Os detalhes dos dados são mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Valores utilizados na definição dos pesos.

Critérios	Alternativas		
	R_1	R_2	R_3
Quantidade de enlaces – $U(E)$	3	3	4
Slots livres – $U(S)$	93	135	189

Com as funções utilidade individuais já definidas e os critérios já escolhidos, o próximo passo é definir os pesos k_i da função multiatributo aditiva descrita em (3.8).

Etapas do julgamento de indiferença

1. Entre as alternativas descritas na Tabela 3.2, são escolhidas as alternativas que definem a melhor e a pior situação [60], neste caso $U_3(E, S)$ e $U_1(E, S)$ respectivamente:

$$U_3(E, S) = U_3(4, 189), \quad (3.9)$$

$$U_1(E, S) = U_1(3, 93). \quad (3.10)$$

2. O agente de decisão tem duas opções, ou é indiferente entre as alternativas, ou tem a preferência por uma delas. No caso em que se tenha preferência por uma alternativa, esta é mantida e a outra é melhorada. Neste caso, será mantida R_3 e melhorada R_1 , ($R_3 \succ R_1$), ficando da seguinte forma [60]:

$$U_3(E, S) = U_3(4, 189), \quad (3.11)$$

$$U_1^*(E, S) = U_1^*(3, 135). \quad (3.12)$$

3. Esse processo de melhorar as piores alternativas deve prosseguir quantas vezes seja necessário, até que o agente de decisão fique indiferente entre às duas alternativas ($R_3 \sim R_1$).

Cálculo dos pesos

O cálculo dos pesos baseia-se na condição de indiferença entre as alternativas escolhidas. O processo do cálculo dos pesos segue as seguintes etapas [60]:

1. Como há indiferença entre as duas alternativas, pode-se igualar as duas funções utilidade, como segue;

$$U_1^*(3, 135) = U_3(4, 189), \quad (3.13)$$

substituindo os valores utilizando a Equação 3.8, tem-se;

$$k_1 \cdot U_{e1}(3) + k_2 \cdot U_{s1}(135) = k_1 \cdot U_{e3}^*(4) + k_2 \cdot U_{s3}^*(189). \quad (3.14)$$

2. Calcula-se a função utilidade individual de cada alternativa:

$$U_{e1}(3) = \frac{4-3}{4-1} \Rightarrow U_{e1}(3) = 0,33, \quad (3.15)$$

$$U_{e3}(4) = \frac{4-4}{4-1} \Rightarrow U_{e3}(4) = 0, \quad (3.16)$$

$$U_{s1}(135) = \frac{135}{320-3} \Rightarrow U_{s1}(135) = 0,42, \quad (3.17)$$

$$U_{s3}(189) = \frac{189}{320-3} \Rightarrow U_{s1}(189) = 0,59. \quad (3.18)$$

3. Substituindo em (3.14) os valores encontrados, obtém-se;

$$k_1 \cdot 0,33 + k_2 \cdot 0,42 = k_2 \cdot 0,59, \quad (3.19)$$

desenvolvendo (3.19) , tem-se

$$k_1 \cdot 0,33 - k_2 \cdot 0,17 = 0. \quad (3.20)$$

4. A equação encontrada forma um sistema linear com a condição $k_1 + k_2 = 1$, que permite calcular os valores dos pesos de cada critério. Após a realização dos cálculos, foram encontrados os seguintes valores para os pesos k_1 e k_2 , respectivamente:

$$k_1 = 0,33 \quad e \quad k_2 = 0,66. \quad (3.21)$$

5. Por fim, a função custo é definida como:

$$U(E,S) = 0,33 \cdot U(E) + 0,66 \cdot U(S). \quad (3.22)$$

A utilização de modelos simples de decisão, do ponto de vista matemático, permite a organização dos processos de seleção ou de ordenação de alternativas cuja avaliação exige a consideração de múltiplos critérios. É importante ressaltar que as condições de aplicabilidade desta abordagem nem sempre são satisfeitas. Desta forma, será necessário utilizar outras metodologias que, muitas vezes, podem ser mais complexas [60].

A lógica *Fuzzy* foi aprimorada e apresentada pela primeira vez na comunidade científica por Lotfi A. Zadeh, em 1965 [71]. Porém, quem iniciou o desenvolvimento da lógica *Fuzzy*, combinando a teoria clássica da lógica de Aristóteles com graus de pertinência, foi o cientista Jan Lukasiewicz (1878-1956) [72].

O significado do termo *Fuzzy* pode variar em função do contexto em que está inserido, dentre eles pode-se citar termos como vago, incerto, nebuloso, difuso etc. O termo "nebuloso" é o mais utilizado na comunidade científica nos dias atuais [73].

A lógica *Fuzzy* é definida como a lógica que suporta os modos de raciocínio que são aproximados ao invés de exatos, com os quais se costuma trabalhar. A força da lógica *Fuzzy* deriva da sua habilidade de inferir conclusões e gerar respostas baseadas em informações vagas, imprecisas, ambíguas e qualitativamente incompletas [74].

4.1 – Teoria dos Conjuntos *Fuzzy*

A lógica convencional utiliza regras bem definidas para distinguir e separar os conjuntos. Por exemplo, para especificar o peso de um objeto como pesado ou leve, mas nunca as duas ou um meio termo, como meio-pesado ou mais ou menos leve. Com isso, obtêm-se linhas bem definidas para separar os membros dos não membros de uma classe [73].

A lógica *Fuzzy* é baseada na teoria dos conjuntos *Fuzzy*. A observação principal de Zadeh para desenvolver a teoria dos conjuntos *Fuzzy* foi que muitas regras presentes no cotidiano não podiam ser explicadas pelas pessoas [71]. Neste contexto, a teoria de conjuntos *Fuzzy* se torna eficiente, pois consegue modelar a maneira como as pessoas pensam na definição das variáveis, considerando a subjetividade e a experiência dessas pessoas para pegar informações descritas na linguagem natural e transformá-las em valores numéricos. O principal objetivo é conduzir as pesquisas para sistemas inteligentes mais humanos e mais adequados à realidade [75] [72] [73].

A lógica convencional utiliza apenas valores inteiros para determinar o que possa ser leve ou pesado. Neste caso, pode-se definir 0 ou 1, respectivamente. Já na lógica *Fuzzy* os valores intermediários entre 0 e 1 são utilizados. Isto é, pode haver um meio termo, ou situações

que estejam mais próximas de 0 ou de 1 [72]. Na Figura 4.1, é mostrado de forma clara, como é tratada a informação nas duas lógicas.

Um dos princípios da teoria da lógica *Fuzzy* afirma que todos os problemas admitem graus de pertinências. Para exemplificar isso, pode-se tomar como referência a Figura 4.1, na qual, se dois objetos têm os pesos $Obj_1 = 9,5\text{Kg}$ e $Obj_2 = 10,3\text{Kg}$, na lógica clássica o objeto 1 é considerado leve e o objeto 2 pesado, portanto, pertencem a classes distintas. Na lógica *Fuzzy*, cada peso tem seu grau de pertinência do conjunto *Fuzzy* definido no intervalo de $[0,1]$. O grau de pertinência permite avaliar quanto de cada conjunto *Fuzzy* um elemento pode ser, o valor desse elemento possa ser parcialmente verdadeiro e parcialmente falso. Além disso, um elemento pode pertencer a diferentes conjuntos, com um valor de grau de pertinência referente a cada conjunto [73] [74]. Este grau de associação não é probabilístico, mas um cálculo de compatibilidade do elemento com o conceito representado pelo conjunto *Fuzzy* [74].

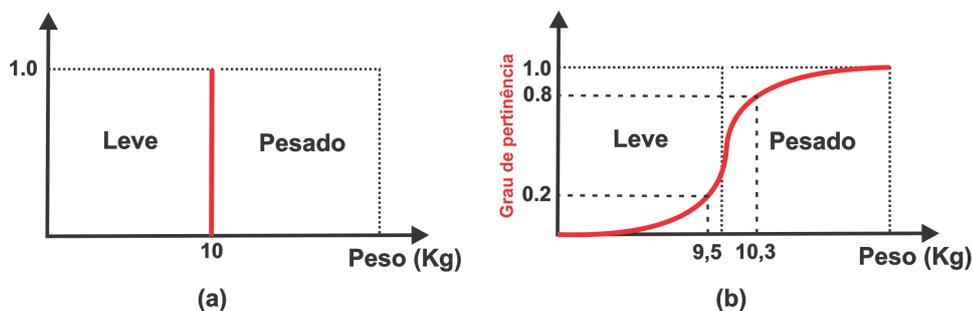


Figura 4.1 – Gráfico representando o peso de um objeto: (a) Lógica convencional, (b) Lógica *Fuzzy*.

Um conjunto *Fuzzy* A em X é expresso como um conjunto de pares ordenados, caracterizado totalmente por sua função de pertinência (FP), como demonstrado em 4.1 [71].

$$A = \{x, \mu_A(X) | x \in X\} \quad (4.1)$$

O conjunto *Fuzzy* modela um conceito impreciso em uma variável numérica, atribuindo-se a cada indivíduo no universo um valor entre 0 e 1, que representa o grau de pertinência deste indivíduo no conjunto [75]. Os componentes do conjunto *Fuzzy* são mostrados graficamente na Figura 4.2.

4.1.1 – Operações

Os conjuntos *Fuzzy* seguem algumas propriedades em relação às operações básicas entre os conjuntos, que são importantes para uma definição matemática correta dos sistemas que utilizam a lógica *Fuzzy*. Há uma relação entre as operações com os conectores lógicos quando se trata de cálculo realizados com proposições [73] [76]. Considerando A e B sendo dois conjuntos *Fuzzy* em um universo X , são definidas algumas operações básicas dos conjuntos *Fuzzy* como [71] [73] [76]:



Figura 4.2 – Componentes do conjunto *Fuzzy*. Extraído de [75].

⇒ Subconjunto

$$A \subset B, \text{ se } \mu_B(x) \geq \mu_A(x) \forall x \in X. \quad (4.2)$$

⇒ Igualdade

$$A = B, \text{ se } \mu_B(x) = \mu_A(x) \forall x \in X. \quad (4.3)$$

⇒ União

$$C = A \cup B, \rightarrow \mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)). \quad (4.4)$$

⇒ Interseção

$$C = A \cap B, \rightarrow \mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)). \quad (4.5)$$

Os conjuntos *Fuzzy* utilizam a relação das operações com os conectores lógicos "E" e "OU". Para isso utilizam-se os conceitos de norma triangular (norma-t), que relaciona o conectivo lógico "E" com a operação de interseção, e a co-norma triangular (norma-s), que relaciona o conectivo lógico "OU" com a operação de união [73] [76]. Gráficos de exemplos das operações com conjunto *Fuzzy* são mostrados na Figura 4.3.

As funções da norma triangular (norma-t) e da norma co-triangular (norma-s), obedecem as seguintes propriedades [73] [76]:

⇒ Comutatividade: $f(a, b) = f(b, a)$;

⇒ Associatividade: $f(a, f(b, c)) = f(f(a, b), c)$

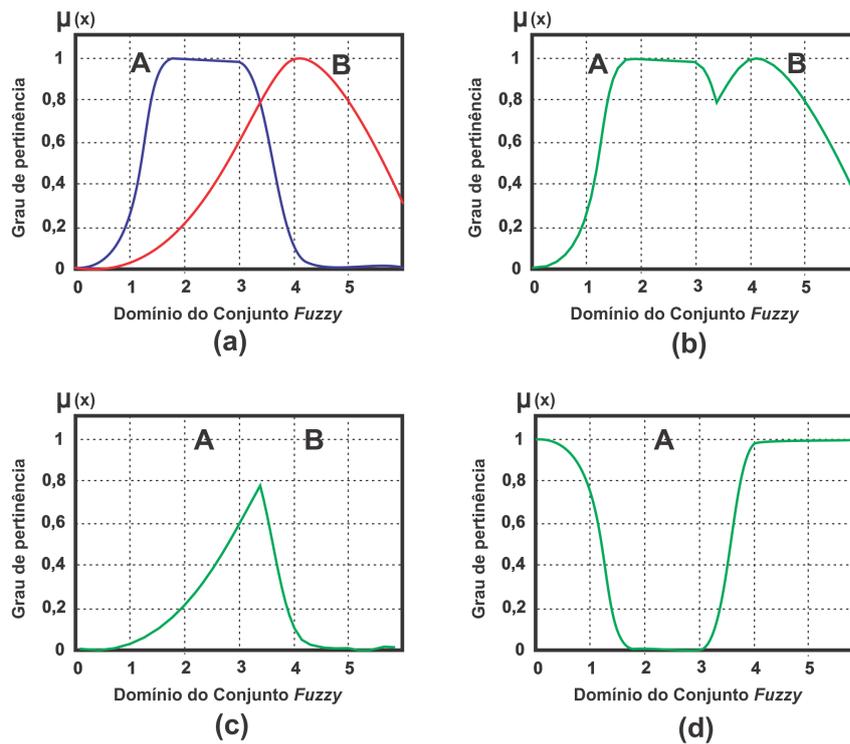


Figura 4.3 – Operações com conjuntos *Fuzzy*: (a) Conjunto *Fuzzy*, (b) Operação união (A ou B), (c) Operação interseção (A e B), (d) Operação não A.

- ▣ Monotonicidade: se $a \leq b$ e $c \leq d$, então $f(a, c) \leq f(b, d)$
- ▣ Coerência nos contornos: $f(a, 0) = 0$ e $f(a, 1) = a$

então, pode-se afirmar que:

$$\text{Interseção de A e B: } \mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x), \quad (4.6)$$

e, da mesma forma, tem-se:

$$\text{União de A e B: } \mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x). \quad (4.7)$$

4.1.2 – Variáveis Linguísticas

Uma variável linguística possui valores que não são números, mas sim palavras ou frases na linguagem natural. Um valor linguístico é um conjunto *Fuzzy*. Ele representa os valores que fornecem uma maneira sistemática de aproximação das variáveis indefinidas de problemas complexos. Podem ser definidas em uma linguagem específica, com termos como: **bom, razoável, ruim, pequeno, grande** etc. e por meio de conectivos lógicos como "NEGAÇÃO", "E" e "OU" [72]. Como exemplo, pode-se citar a quantidade disponível de *slots* ocupados em um

espectro na transmissão de dados em uma rede óptica, que pode ser uma variável linguística com valores de pouco, médio e muito, Figura 4.4. Neste contexto, pode-se afirmar que uma modelagem *Fuzzy* expressa a semântica utilizada por especialistas [73].

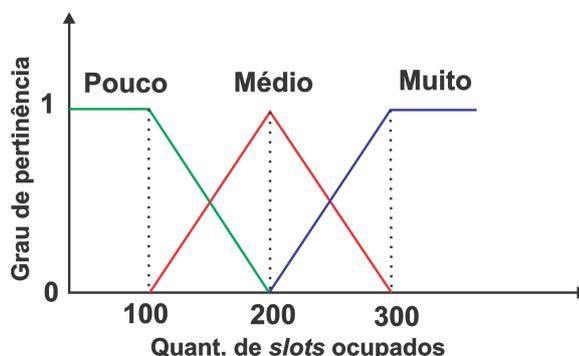


Figura 4.4 – Exemplo de gráfico da função de pertinência para a variável quantidade de *slots* ocupados.

Outro tipo de variável linguística muito utilizada são os modificadores, termos ou operações usados para modificar a intensidade dos valores *Fuzzy*. Como consequência, a forma dos conjuntos é alterada. Por exemplo, pode-se citar as palavras **extremamente**, **um pouco**, **mais ou menos**, etc [73]. Os modificadores podem ser classificados em aumentadores ou diminuidores, de acordo como agem na modificação da área de pertinência de um conjunto *Fuzzy* [74].

O principal objetivo das variáveis linguísticas é a utilização de termos linguísticos do dia a dia empregados por pessoas, permitindo a análise de sistemas complexos por meio de mecanismos matemáticos. Assim, uma variável linguística é composta dos seguintes termos [76]:

- ▣ Nome da variável;
- ▣ Conjunto de nomes dos valores linguísticos de uma variável;
- ▣ Universo de discurso;
- ▣ Uma regra, que gera os valores da variável como uma composição em termos do conjunto dos valores linguísticos, conectivos lógicos, modificadores e delimitadores;
- ▣ Uma regra, para associar a cada valor gerado pela regra sintática em um conjunto *Fuzzy* no universo do discurso.

4.1.3 – Proposições e Regras *Fuzzy*

Uma forma do raciocínio lógico é o raciocínio dirigido, denominado de inferência. A inferência é um processo do raciocínio dirigido que leva à formação de uma proposição. Já o termo proposição pode ser definido como o significado de uma sentença ou oração declarativa. A conclusão de um argumento é a proposição que se afirma com base em outras proposições. As

proposições que são enunciadas como o motivo para se aceitar a conclusão são definidas como premissas desses argumentos [74]. Uma equação lógica segue as regras básicas de inferência, como mostrado no exemplo a seguir [74] [73] [76]:

- ▣ M é A (premissa). Essa frase é uma proposição *Fuzzy*, em que M é o nome de uma variável linguística, e A é um subconjunto *Fuzzy* definido no universo X de M ;
- ▣ $A \subset B$ (argumento, A está contido em B);
- ▣ **Se M é A , então, M é B** (conclusão). Declaração condicional *Fuzzy* que descreve a dependência do valor de uma variável linguística em relação ao valor de outra variável linguística.

As proposições *Fuzzy* podem ser combinadas com diferentes operadores, gerando novas proposições. As proposições *Fuzzy* resultantes da combinação podem ser descritas em termos de relações *Fuzzy*. A determinação do valor desta relação, em função dos conjuntos *Fuzzy* de cada operando, pode ser realizada de muitas maneiras diferentes [76].

Basicamente, as regras *Fuzzy* consistem em condições (**SE**), utilizando os conectivos (**E**, **OU** ou **NÃO**), com um conclusão (**ENTÃO**) ou uma conclusão opcional (**SE NÃO**). São consideradas regras normais utilizadas para operar conjuntos *Fuzzy*, com a função de obter consequentes. Estas regras são utilizadas parcialmente, dependendo do antecedente. A criação dessas regras segue um raciocínio coerente que consiste em primeiro, avaliar o antecedente da regra e, em seguida, aplicar o resultado no consequente. Em uma modelagem *Fuzzy*, pode existir vários antecedentes, e o resultados das regras podem ser aplicados a vários consequentes [73] [74].

4.1.4 – Funções de Pertinência

As funções de pertinência são consideradas os termos primários da lógica *Fuzzy*, que estão associados diretamente aos conjuntos *Fuzzy*. As funções de pertinência são definidas de três formas: funções de pertinência analíticas, funções de pertinência lineares, resultando em formas triangulares ou trapezoidais e funções de pertinência discretizadas [76]. Neste trabalho, serão abordadas as funções de pertinência lineares.

As funções de pertinência são métodos para adquirir o conhecimento do especialista, refletindo esse conhecimento em relação à intensidade com que o objeto pertence ao conjunto *Fuzzy*. São funções não probabilísticas monotonicamente crescentes, decrescentes ou subdivididas em partes crescentes e partes decrescentes. Considera-se que cada variável *Fuzzy* possui um conjunto de funções de pertinência ($\mu_A(X)$), representadas em um universo X , que exprimem o conjunto das variáveis linguísticas do sistema, em que cada função de pertinência possui uma variável lógica associada [74].

As principais funções de pertinência são a triangular, a trapezoidal e a gaussiana, apresentadas em 4.9, 4.11 e 4.12, respectivamente [77]. Estas funções são as mais

utilizadas pela facilidade na determinação dos parâmetros e, principalmente, pela simplicidade de implementação. Na Figura 4.5, são mostradas as representações gráficas dos três tipos de função pertinência supracitados.

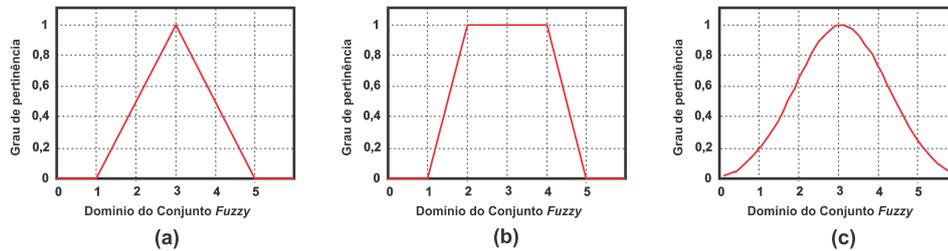


Figura 4.5 – Exemplos de função pertinência: (a) Triangular, (b) Trapezoidal e (c) Gaussiana.

►► Função de pertinência triangular:

$$\mu(X) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}, \quad (4.8)$$

$$\mu_{\text{tri}}(x, a, b, c) = \max \left[0, \min \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right) \right] \quad (4.9)$$

►► Função de pertinência trapezoidal:

$$\mu(X) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}, \quad (4.10)$$

$$\mu_{\text{trap}}(x, a, b, c, d) = \max \left[0, \min \left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right) \right] \quad (4.11)$$

►► Função de pertinência gaussiana:

$$\mu_{\text{gaus}}(x) = e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.12)$$

em que, m é a média e σ é o desvio padrão da função.

4.2 – Roteamento Utilizando a Lógica Fuzzy

O problema de roteamento é um dos problemas de otimização combinatória. Este problema é encontrado em todas as redes que não permitem que os dados que saem da origem alcancem o destino em um único salto na transmissão, mas, em vez disso, devem atravessar um caminho de enlaces intermediários. Em geral, técnicas de roteamento tradicionais são baseadas em soluções gráfico-teóricas para encontrar o caminho mais curto que liga um nó de origem a um nó de destino [6] [77].

Em redes de comunicação de banda larga, uma grande variedade de serviços é utilizada gerando diferentes classes de carga com taxas de *bits* variáveis. Estas exigências precisam de novas estratégias de roteamento que considerem uma variedade de parâmetros topológicos e de carga. Os métodos *Fuzzy* podem ser usados para resolver essa tarefa complexa [6].

Estratégias de roteamento de caminhos mais curtos baseiam-se em informações sobre a topologia da rede. De acordo com uma métrica, um peso é atribuído a cada enlace da rede. Em seguida, um algoritmo de caminho mais curto, como *Dijkstra* ou *Bellman-Ford* calcula os caminhos mais curtos de um determinado nó de origem para qualquer outro nó na rede [16]. Em um algoritmo de roteamento adaptativo, cada nó tem que realizar tarefas como, compartilhar as informações com outros nós, calcular os caminhos mais curtos para todos os outros nós (com base nas informações de topologia) e coletar informações sobre a rede. Analisando essas tarefas, pode-se indagar onde estão as desvantagens dessa estratégia e onde o método *Fuzzy* poderia ser útil para melhorar o desempenho da rede? A resposta está na tarefa de tratar informações sobre a rede para serem utilizadas na decisão de roteamento e é exatamente nessa área que os sistemas *Fuzzy* podem mostrar sua importância [6] [77].

A idéia principal dessa abordagem é usar um sistema *Fuzzy* para obter uma função custo para calcular a rota de forma eficiente a partir de um conjunto de parâmetros. Uma função custo pode ser usada como entrada para um algoritmo de caminho mais curto.

Para definir essa função custo para roteamento em redes ópticas, é utilizado o método de raciocínio da lógica *Fuzzy* desenvolvido por Mamdani [11] [74] [73] [77]. Nas próximas seções, será abordado, de forma detalhada, todo o processo de definição da função custo para roteamento.

4.2.1 – A Lógica Fuzzy de Mamdani

O sistema Mamdani foi criado pelo professor Ebrahim Mamdani da Universidade de Londres (Reino Unido), em 1975. Neste método, cada entrada de uma variável linguística, seja um número real, ou um par de números reais, pertencente ao universo de valores linguísticos deverá corresponder a uma saída pertencente a um conjunto *Fuzzy*, por meio de uma regra semântica que relaciona cada valor linguístico a este conjunto. Para a construção desse sistema, foi definido um processo de raciocínio dividido em três etapas [77] [73] [74]. Na Figura 4.6, é mostrado um esquema que representa todo o processo desse método [77].

1. Fuzzificação: essa primeira etapa modela matematicamente a informação das variáveis de entrada com os conjuntos *Fuzzy* por meio da análise do problema. Esta etapa inclui também a criação das regiões, em que devem ser atribuídos, a cada variável de entrada, termos linguísticos que representam os estados dessa variável e, a cada termo linguístico, deve ser associado um conjunto *Fuzzy* por uma função de pertinência [77] [73] [74];
2. Inferência: nesta etapa, são definidos o conjunto de regras que constitui o núcleo do sistema, é realizada a classificação linguística de cada variável definida na etapa anterior e quais são os conectivos lógicos usados para estabelecer a relação *Fuzzy* que modela o conjunto destas regras. Esta é uma etapa importante para o sucesso do sistema *Fuzzy*, pois, com a inferência, a partir de cada entrada *Fuzzy* o sistema fornecerá a saída *Fuzzy* a ser usada pela próxima etapa [77] [73] [74];
3. Defuzzificação: converte o estado da variável de saída *Fuzzy* para um valor numérico [77] [73] [74].

Fuzzificação

No processo de fuzzificação é realizada uma análise detalhada do problema para definir as variáveis linguísticas que transformam os dados de entrada em conjuntos *Fuzzy*, e quais as funções de pertinência que mapeiam cada entrada do sistema em um ou mais graus de pertinência. Para obter o grau de pertinência de uma variável, é consultada a base de conhecimento do sistema *Fuzzy* [77] [73] [74]. Na Figura 4.6 é mostrado um esquema simplificado das fases do processo de Mamdani.

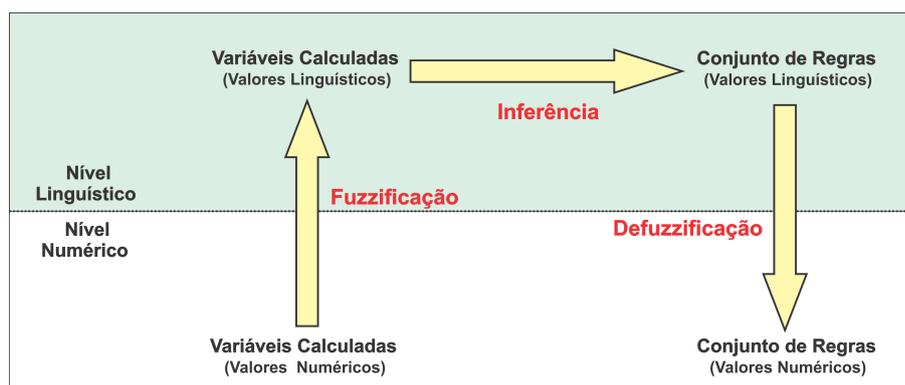


Figura 4.6 – Esquema do processo de Mamdani. Adaptado de [73]

A seguir, processo da etapa de fuzzificação, em relação ao problema de roteamento, foco deste trabalho.

- ▣ Análise do problema – O problema abordado é a escolha da rota entre o nó de origem e o nó de destino em redes ópticas elásticas dinâmicas. Este é um subproblema do problema RSA, que engloba a fase de roteamento e alocação de espectro.

Definição das variáveis – Os critérios utilizados são os mesmos já definidos no Capítulo 3: quantidade de enlaces na rota e quantidade de *slots* ocupados no espectro de transmissão. A partir desses critérios, são definidas as variáveis que compõem o conjunto de variáveis linguísticas, na Tabela 4.1, são mostradas as variáveis escolhidas.

Tabela 4.1 – Variáveis linguísticas dos critérios.

Critérios	Variáveis linguísticas		
Quantidade de enlaces na rota	Ótimo	Bom	Ruim
Quantidade de <i>slots</i> ocupados	Pouco	Médio	Muito

Definição das regiões e funções de pertinência – Para este trabalho serão usadas as funções de pertinências triangular e trapezoidal. Os gráficos de cada função com suas respectivas regiões já definidas são mostrados na Figura 4.7 para o critério de quantidade de enlace, e na Figura 4.8 para o critério quantidade de *slots* ocupados. Os valores dos limitadores utilizados também são os mesmos já definidos no Capítulo 3. Para o critério de quantidade de enlaces, o limite inferior é 1, e o limite superior é a quantidade máxima de enlaces de cada topologia de rede que será utilizada nas simulações, denotada por E_{max} . Para o critério quantidade de *slots* ocupados, o limite inferior é 3 *slots* e o limite superior está definido como 320 *slots*.

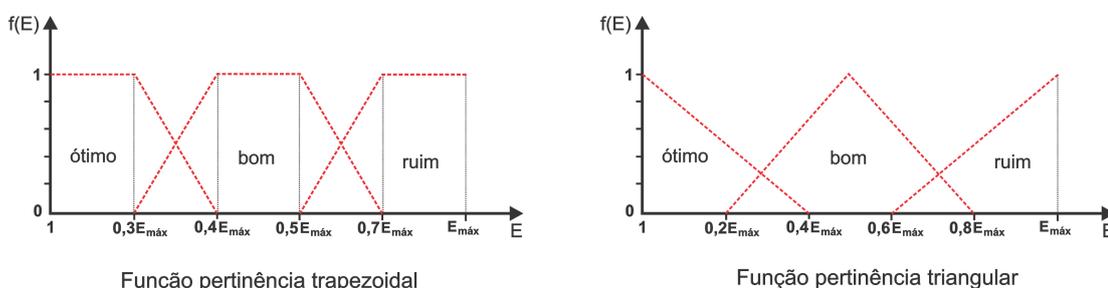


Figura 4.7 – Regiões do conjunto Fuzzy para o critério quantidade de enlace.

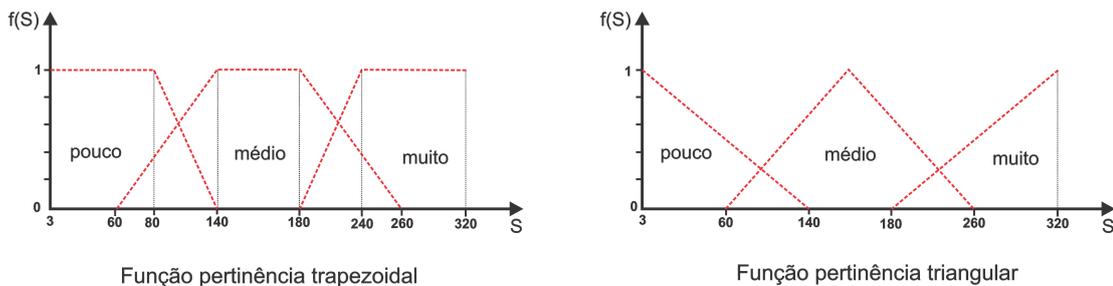


Figura 4.8 – Regiões do conjunto Fuzzy para o critério quantidade de *slots* ocupados.

Definição das Regras *Fuzzy* para Roteamento

O próximo passo é definir as regras para o conjunto dos antecedentes. O conjunto de regras *Fuzzy* representa o conhecimento humano por meio de um conjunto de regras que é caracterizado por ser uma expressão condicional sob a forma **SE** (antecedente) **ENTÃO** (consequente), que especifica uma relação linguística entre as variáveis de entrada e saída do sistema. O antecedente define as condições verificadas pela regra, e o consequente define a saída no caso de todas as proposições do antecedente serem verdadeiras [77] [73].

O conjunto de regras que serão utilizadas na inferência pode ser definido de duas maneiras, baseando-se em regras individuais ou em composição de regras. Na inferência baseada em regras individuais, cada regra determina um conjunto *Fuzzy* de saída, que representa a combinação de vários conjuntos *Fuzzy* individuais [77] [73] [74].

Para se obter um único valor de antecedentes, é feita uma combinação de regras que pode ser realizada pelo operador lógico "OU". Neste caso, a saída terá o valor com maior grau de pertinência, conseqüentemente, se a combinação utilizar o operador lógico "E", a saída terá o valor com o menor grau de pertinência [73]. Na Tabela 4.2, são mostrados os antecedentes de cada critério que são combinados pelo operador "E" e as regras que definem os consequentes.

Após essa etapa, é necessário obter o valor do consequente por meio de um método de correlação. Este é o processo de inferência. Nesta etapa são agregadas todas as saídas do conjunto dos consequentes em um único conjunto *Fuzzy*. A etapa de inferência prepara os dados linguísticos para a próxima etapa, que é a de defuzzificação, no qual esses dados serão convertidos em valores numéricos [73] [74].

Na Tabela 4.3 pode-se visualizar um exemplo das etapas de fuzzificação e inferência do método de Mamdani, utilizando valores reais retirados da simulação para o cálculo do custo de uma rota. Os dados são: 104 *slots* ocupados, 2 enlaces e função pertinência triangular.

Tabela 4.2 – Conjunto de regras para a base de conhecimento *Fuzzy*.

Regras	SE Quant. Enlace	E Quant. <i>slots</i> ocupados	ENTÃO Rota
1	Ótimo	Pouco	Excelente
2	Ótimo	Médio	Excelente
3	Ótimo	Muito	Razoável
4	Bom	Pouco	Excelente
5	Bom	Médio	Razoável
6	Bom	Muito	Péssimo
7	Ruim	Pouco	Razoável
8	Ruim	Médio	Péssimo
9	Ruim	Muito	Péssimo

Tabela 4.3 – Exemplo do método de Mamdani: Etapas de fuzzificação e inferência.

1º etapa – Fuzzificação		2º etapa – Inferência		
Grau de pertinência		Regras		
Enlaces	Slots	Excelente	Razoável	Péssimo
Ótimo – 0,37	Pouco – 0,76	Min(E,S) – 0,37	0	0
Ótimo – 0,37	Médio – 0,17	Min(E,S) – 0,17	0	0
Ótimo – 0,37	Muito – 0	0	Min(E,S) - 0	0
Bom – 0,16	Pouco – 0,76	Min(E,S) – 0,16	0	0
Bom – 0,16	Médio – 0,17	0	Min(E,S) - 0,16	0
Bom – 0,16	Muito – 0	0	0	Min(E,S) – 0
Ruim – 0	Pouco – 0,76	0	Min(E,S) - 0	0
Ruim – 0	Médio – 0,17	0	0	Min(E,S) – 0
Ruim – 0	Muito – 0	0	0	Min(E,S) – 0
		Max(Exc) – 0,37	Max(Raz) – 0,16	Max(Pés) – 0

Defuzzificação

Esta é última etapa do método de Mamdani, o valor da variável linguística de saída obtido pelas regras *Fuzzy* é convertido em um valor numérico que melhor represente os valores *Fuzzy* definidos pela variável linguística de saída. Esta etapa corresponde à conexão entre as regiões *Fuzzy* e o valor esperado [77] [73].

Dentre os diversos tipos de técnicas de defuzzificação destacam-se: Centróide, Primeiro-Máximo e Critério Máximo. Na escolha de um defuzzificador, os critérios de simplicidade computacional e de continuidade devem ser considerados. O método mais utilizado é a do Centróide, também utilizado neste trabalho. Neste método, a precisão vai depender do intervalo utilizado para o cálculo, quanto menor o intervalo, mais preciso será o resultado [77] [73]. O valor do custo encontrado para o exemplo utilizando o método centróide é mostrado na Equação 4.14. Na Figura 4.9, é mostrado o gráfico com os resultados da inferência para a utilização na etapa de defuzzificação.

$$C = \frac{(1+2+3+4) \cdot \text{Max}(\text{exc}) + (2+3+4+5+6+7+8) \cdot \text{Max}(\text{raz}) + (6+7+8+9+10) \cdot \text{Max}(\text{pes})}{4 \cdot \text{Max}(\text{exc}) + 7 \cdot \text{Max}(\text{raz}) + 5 \cdot \text{Max}(\text{pes})} \quad (4.13)$$

$$C = \frac{10 \cdot 0,37 + 35 \cdot 0,16 + 40 \cdot 0}{4 \cdot 0,37 + 7 \cdot 0,16 + 5 \cdot 0} \Rightarrow C = 3,57 \quad (4.14)$$

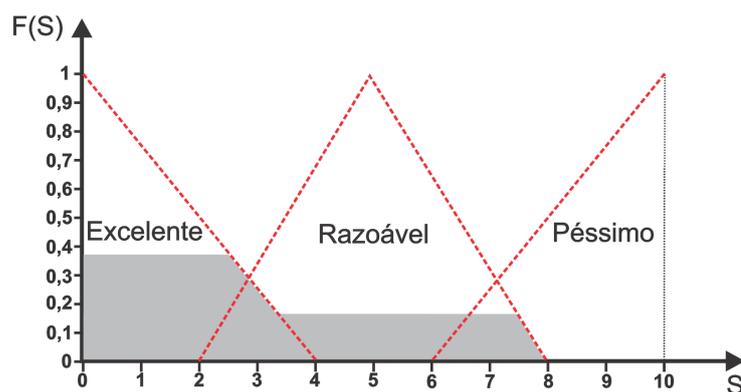


Figura 4.9 – Exemplo da etapa de defuzzificação do método de Mamdani.

O método da lógica *Fuzzy* de Mamdani é o mais usado em aplicações, uma vez que tem uma forma muito simples de operações estruturadas [73] [74]. Um dos problemas que impede a lógica *Fuzzy* ser eficiente para cálculo de custo em roteamento é a rigidez das suas regras, na qual todo o processo fica preso as definições das regras estabelecidas pelo agente de decisão.

Simulação e Resultados

Neste trabalho, foram realizadas simulações de sistemas de roteamento multicritério, para as quais foi definido um método para determinar o custo das rotas utilizando duas abordagens multicritério: MAUT e lógica *Fuzzy*. Para comparar esses sistemas de roteamento com o algoritmo tradicional de menor custo, *Dijkstra*, foram realizadas simulações de rede. Os resultados são analisados para avaliar o impacto dos sistemas no desempenho das redes.

Para demonstrar o desempenho dos algoritmos de roteamento, foi utilizado o parâmetro probabilidade de bloqueio (PB), definido por (5.1), em que C_i é a capacidade da i -ésima demanda, e A_i representa a relação aceite/bloqueio de cada requisição. Os algoritmos de roteamento utilizados neste trabalho são empregados em simulações de eventos discretos realizados com o *software* MATLAB, versão 2012, em um computador com um processador Intel Core 2 (2,66 GHz) e 2 GB de RAM.

$$PB = \frac{\sum C_i \cdot A_i}{\sum C_i} \quad (5.1)$$

Com a proposta de comparar o desempenho de algoritmos de roteamento da abordagem multicritério com o algoritmo de roteamento *Dijkstra* de menor caminho, são empregados as características do simulador e a proposta de algoritmo para roteamento de menor custo e alocação de espectro do trabalho de Xin Wan [4].

A proposta do algoritmo de Xin Wan [4] divide o problema RSA em três etapas. Para as duas etapas iniciais, é utilizado o algoritmo *k Shortest Paths Algorithm* (KSP) de Yen [78], para o processamento de roteamento e alocação de espectro. Primeiramente, os k caminhos mais curtos são calculados (*off-line*) usando o algoritmo *Dijkstra*. A segunda etapa é a de alocação do espectro, em que o KSP emprega a interseção de espectro, para verificar se o caminho tem um espectro disponível. Esta etapa obtém todos os segmentos viáveis do espectro que satisfaçam as restrições do problema básico. A Figura 5.1 mostra um exemplo de como é realizada essa interseção. Finalmente, o KSP retorna o caminho mais curto com espectro disponível. A terceira etapa é a de seleção de segmento, na qual, para escolher um segmento viável, é empregado o método de seleção *First-fit* (FF).

Para as simulações, foram utilizadas três topologias de rede: NSFNET (rede de área ampla com 14 nós e 22 enlaces, Figura 5.2), Torus (rede em malha com 9 nós e 18 enlaces,

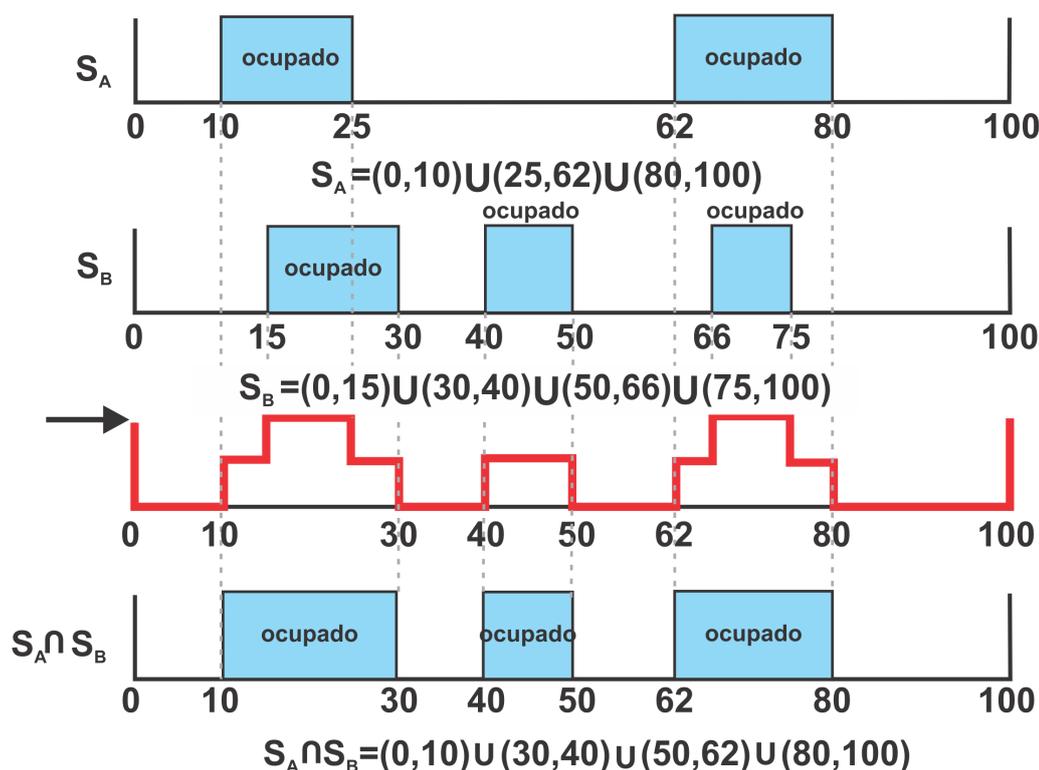


Figura 5.1 – Exemplo de interseção do espectro utilizado pelo algoritmo KSP. Adaptado de [4].

Figura 5.3) e Anel (rede clássica com 9 nós e 9 enlaces, Figura 5.4). A fibra óptica tem uma janela espectral com banda total de 4.000 GHz, dividido em 320 *slots* com banda de 12,5 GHz cada. Todas as demandas de tráfego são uniformemente distribuídas entre origens e destinos com taxas de *bits* que variam a partir de 10 Gbits/s até 200 Gbits/s de forma contínua, com uma taxa de *bits* média de 105 Gbits/s. A chegada de tráfego é um processo de Poisson. As durações (tempos de retenção) seguem uma distribuição exponencial. Foram realizadas para cada carga de tráfego dez rodadas de simulações e os resultados foram estabelecidos pela média com um intervalo de confiança de 95%. A abordagem de roteamento implementada é a de roteamento central, onde todas as decisões de roteamento são tomadas na origem da demanda. O número de demandas em cada simulação é de 100.000. Foram descartadas as primeiras 5.000 demandas da avaliação de desempenho para evitar transitórios nas simulações.

Para as simulações deste trabalho, foram realizadas algumas alterações no modelo de algoritmo de Xin Wan. Um fluxograma do simulador é mostrado na Figura 5.5. As etapas utilizadas nas simulações são descritas a seguir:

1. Em cada solicitação de requisição de conexão, são colocadas em uma tabela as K possíveis rotas do nó de origem ao nó de destino (Algoritmo (1)).
2. Para cada rota da tabela, é calculado seu custo com a função custo definida pelas abordagens multicritério, sendo o Algoritmo (3) utilizado para a MAUT e o Algoritmo (4) correspondente ao sistema *Fuzzy*.

3. Após ser calculado o custo de todas as rotas, a rota de melhor custo é indicada para a requisição da conexão.
4. Utilizando o algoritmo de interseção de espectro (Algoritmo (2)), em conjunto com a heurística Fist-Fit, é alocada a faixa de espectro para a requisição.

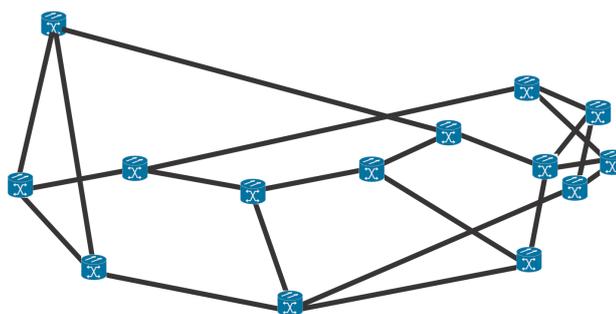


Figura 5.2 – Topologia NSFNET.

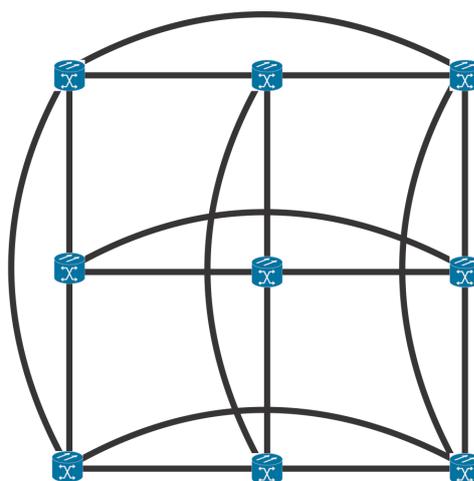


Figura 5.3 – Topologia Torus.

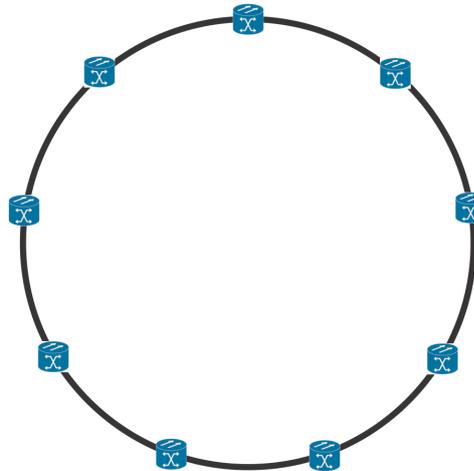


Figura 5.4 – Topologia Anel.

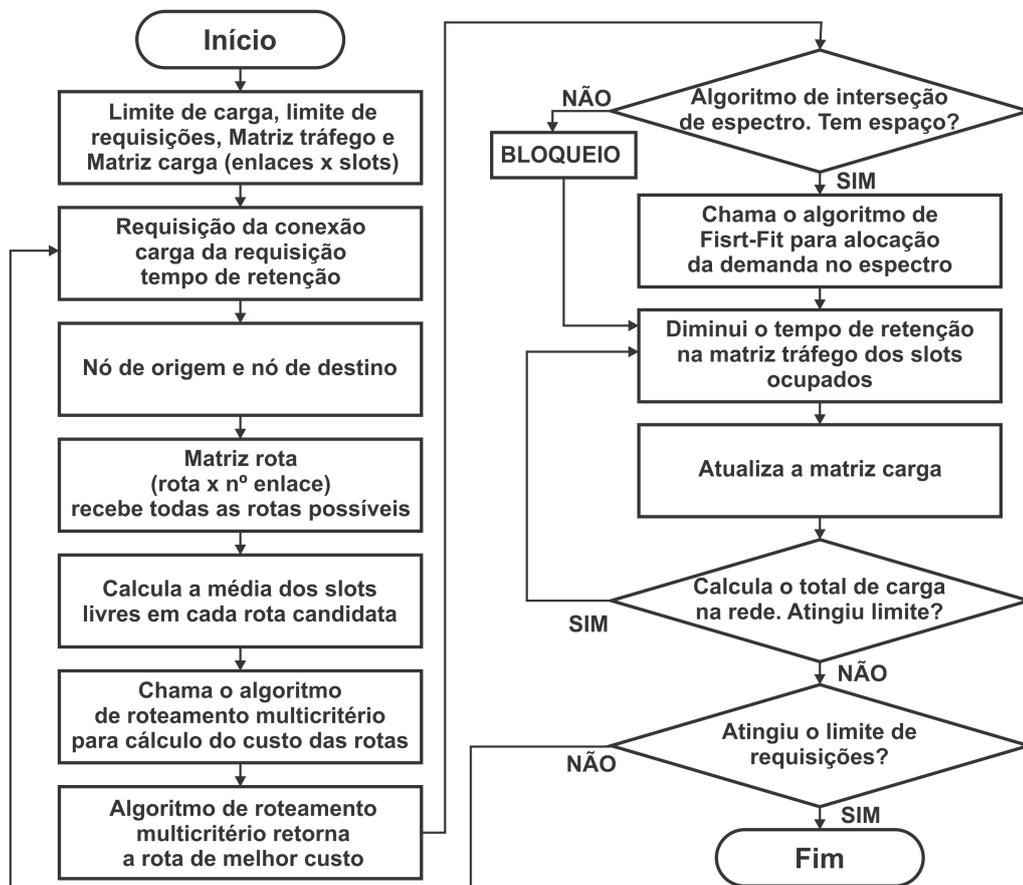


Figura 5.5 – Fluxograma do simulador RSA.

Algoritmo 1 Roteamento KSP. Adaptado de [4].

Entrada: Todas as k rotas de um nó de origem ao nó de destino da requisição de conexão, colocadas em uma tabela K_t .

Saída: Uma rota R para ser utilizada pela demanda ou BLOQUEIO

para k rotas da tabela K_t **faça**

$q \leftarrow$ quantidade de slots livre de k

É chamado o algoritmo de cálculo de custo das rotas

retorna $R \leftarrow R_{mc}$

É chamado o algoritmo de interseção de espectro

se Espaço disponível nos enlaces das rotas **então**

Requisição $\leftarrow R$

caso contrário

Requisição $\leftarrow 0$

retorna BLOQUEIO \leftarrow BLOQUEIO + 1

fim

retorna Requisição de conexão aceita

fim do laço 'para'

Algoritmo 2 Interseção de Espectro. Extraído [4].

Entrada: $S_A = \cup_{i=1}^{k_A} (a_{2i-1}, a_{2i})$ e $S_B = \cup_{j=1}^{k_B} (b_{2j-1}, b_{2j}) : a_1 = b_1$ e $a_{2k_A} = b_{2k_B}$

Saída: $S_C = S_A \cap S_B = \cup_{k=1}^{k_C} (c_{2k-1}, c_{2k})$

$i, j, k \leftarrow 1, x \leftarrow 2$ (número de espectros de entrada)

enquanto $i \leq 2k_A$ e $i \leq 2k_B$ **faça**

se $a_i \leq b_i$ **então**

$f \leftarrow a_i, y \leftarrow x + (-1)^i, i \leftarrow i + 1$

caso contrário se $a_i < b_i$ **então**

$f \leftarrow b_j, y \leftarrow x + (-1)^j, j \leftarrow j + 1$

fim

se $(y = 0, x > 0)$ ou $(y > 0, x = 0)$ **então**

$c_k \leftarrow f, k \leftarrow k + 1$

fim

$x \leftarrow y$

fim do laço 'enquanto'

retorna S_C (com) $k_C \leftarrow \lfloor k/2 \rfloor$

Algoritmo 3 Cálculo do custo da rota, utilizando a abordagem multicritério MAUT.

Entrada: q slots livres no espectro de cada rota candidata, Tabela K_t de rotas candidatas,

Saída: Uma rota $R_{m,c}$ de menor custo

para $x = 1$ até a quantidade de K_t **faça**

$Qr_x \leftarrow$ quantidade de enlaces da rota x

$Sr_x \leftarrow$ quantidade de slots livres da rota x

fim do laço 'para'

$M_{Sr} \leftarrow$ Média de Sr_x

para $k = 1$ até a quantidade de K_t **faça**

Calcule o custo para cada rota k , utilizando a função custo MAUT

$Vr_k \leftarrow$ Custo da rota k

fim do laço 'para'

retorna $R_{m,c} \leftarrow$ a rota k de menor custo Vr_k

Algoritmo 4 Cálculo do custo da rota, utilizando a abordagem multicritério Fuzzy.

Entrada: q slots livres no espectro, K_t total de rotas candidatas,

Saída: Uma rota S de menor custo

para $x = 1$ até a quantidade de K_t **faça**

$Qr_x \leftarrow$ quantidade de enlaces da rota x

$Sr_x \leftarrow$ quantidade de slots livres da rota x

fim do laço 'para'

para $X = 1$ até K_t **faça**

Calcule o grau de pertinência para cada rota k de acordo com o valor de Qr_x

$GP_{Qr} \leftarrow GP_k$

Calcule o grau de pertinência para cada rota k de acordo com o valor de Sr_x

$GP_{Sr} \leftarrow GP_k$

fim do laço 'para'

para $k = 1$ até a quantidade de K_t **faça**

Calcule o custo para cada rota k , utilizando a função custo FUZZY

$Vr_k \leftarrow$ Custo da rota k

fim do laço 'para'

retorna $R_{m,c} \leftarrow$ a rota k de menor custo Vr_k

5.1 – Roteamento utilizando MAUT

Para a simulação do roteamento multicritério utilizando a teoria da função utilidade multiatributo, foram definidos os pesos utilizando o método da taxa de substituição, apresentado no Capítulo 3. Esses pesos foram utilizados em (5.2), com a intenção de mostrar a importância e o efeito que a escolha desses pesos podem causar no resultado final. Os pesos foram calculados em três situações distintas de tráfego na rede, tráfego baixo, médio e alto. Na Tabela 5.1, são mostrados os valores dos pesos para cada alternativa de simulação.

Tabela 5.1 – Pesos utilizados em cada alternativa de simulação com a função utilidade.

Função	k_1	k_2	Tráfego
$U_1(E, S)$	0,41	0,59	baixo
$U_2(E, S)$	0,33	0,66	médio
$U_3(E, S)$	0,25	0,75	alto

A função utilidade multiatributo $U(E, S)$ para calcular o custo de cada rota é definida por.

$$U(E, S) = k_1 \cdot \frac{T_E - N_E}{T_E - 1} + k_2 \cdot \frac{Q_S}{S_S - 3} \quad (5.2)$$

5.1.1 – Resultados

A seguir, são discutidos os resultados para cada topologia de rede, na comparação do algoritmo *Dijkstra* com o algoritmo da Função Utilidade Multicritério.

Topologia NSFNET

Pode ser visto na Figura 5.6 o desempenho dos algoritmos de roteamento na topologia NSFNET. O algoritmo multicritério foi melhor em comparação com o algoritmo *Dijkstra* em todas as alternativas. Pode-se perceber uma pequena diferença no resultado das simulações entre as alternativas multicritério, em que seus desempenhos foram de acordo com o tipo de carga de tráfego utilizada para cálculo dos pesos. Comparando as três alternativas multicritério, pode-se destacar que a alternativa U_1 piorou o desempenho com o aumento da carga de tráfego, e a alternativa U_3 teve um desempenho inferior com baixa carga, mas que vai melhorando com o aumento do tráfego, chegando a ser o melhor resultado entre todos com a carga de tráfego mais alta. A alternativa U_2 teve um desempenho intermediário, aproximando-se do desempenho da alternativa U_3 .

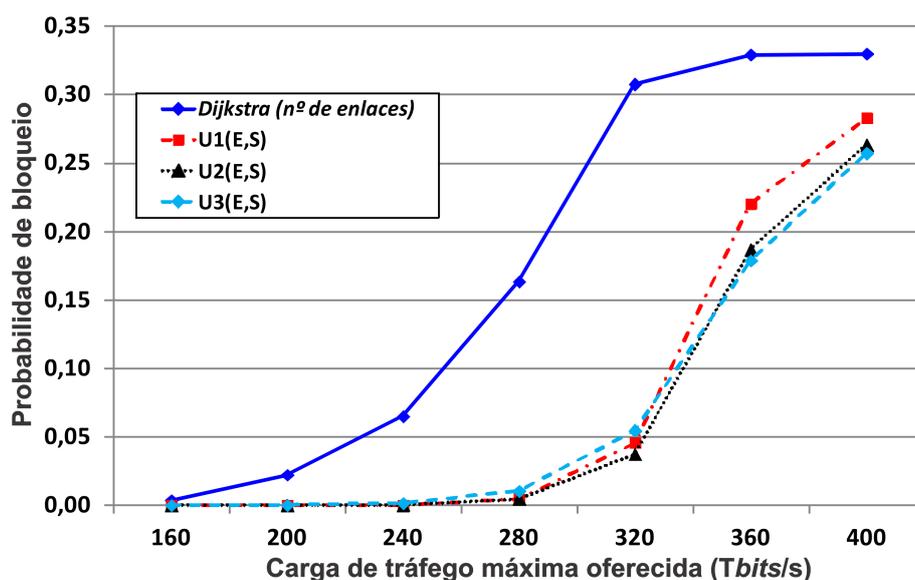


Figura 5.6 – Resultado da simulação: *Dijkstra versus* Função Utilidade – Topologia NSFNET.

Topologia Torus

O desempenho dos algoritmos de roteamento na topologia Torus é mostrado na Figura 5.7. Nessa topologia, o algoritmo multicritério também foi melhor em todos os casos, em comparação com o algoritmo de roteamento *Dijkstra*. Em relação à comparação entre as três alternativas multicritério o comportamento foi o mesmo encontrado na topologia NSFNET, em que o melhor resultado com baixa carga de tráfego é o das alternativas U_1 e U_2 . Com um aumento razoável na carga de tráfego, obtém-se a alternativa U_3 como a que apresentou o melhor desempenho.

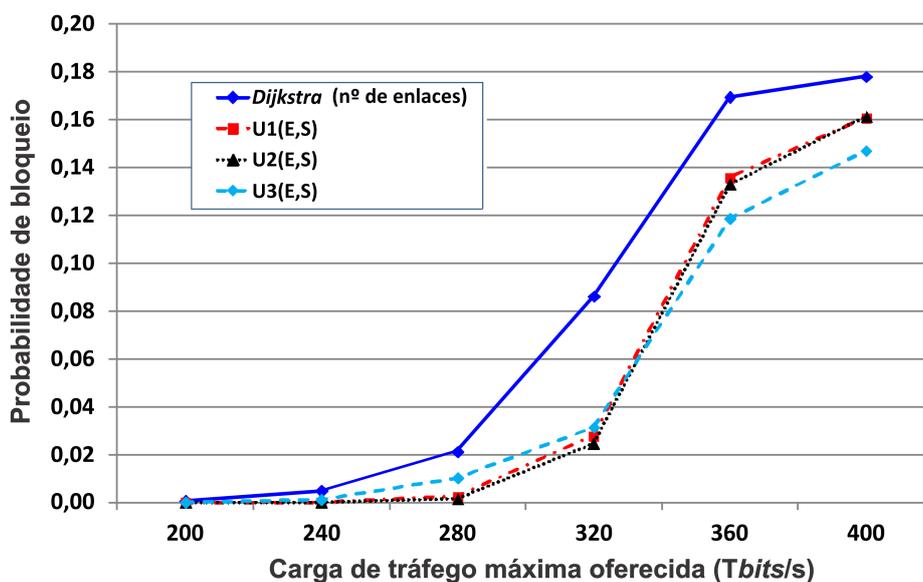


Figura 5.7 – Resultado da simulação: *Dijkstra versus* Função Utilidade – Topologia Torus.

Topologia Anel

Com relação ao desempenho dos algoritmos na topologia Anel, não há diferenças entre o algoritmo de roteamento *Dijkstra* e o algoritmo multicritério, como mostrado na Figura 5.8. Por ser uma topologia com poucas opções de enlaces entre os nós, observa-se a importância do critério que o algoritmo *Dijkstra* utiliza, não sendo a abordagem multicritério adequada a essa topologia.

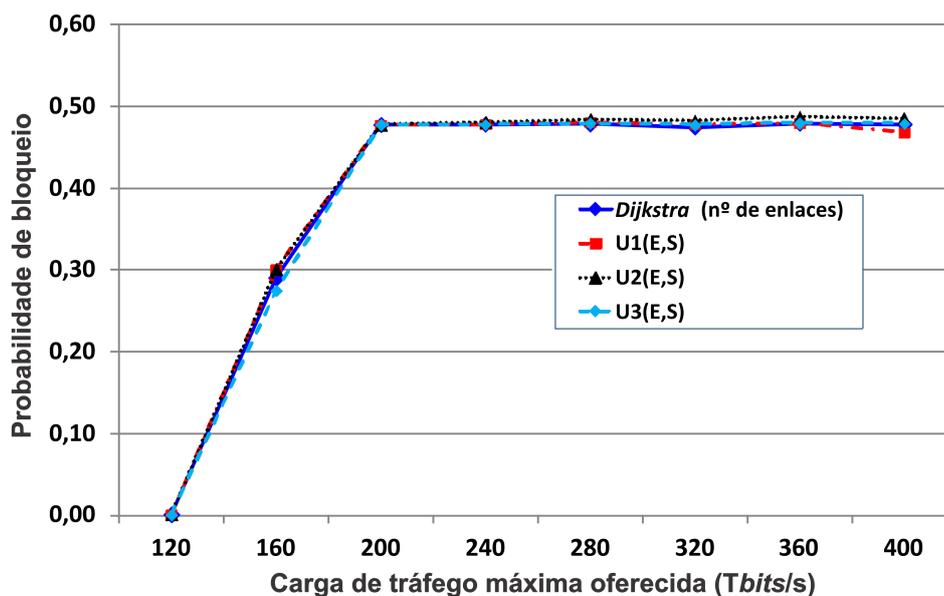


Figura 5.8 – Resultado da simulação: *Dijkstra* versus Função Utilidade – Topologia Anel.

5.2 – Roteamento utilizando *Fuzzy*

As simulações utilizando a Lógica *Fuzzy* para determinar o custo da rota têm como base a lógica de Mamdani [11] para montar o sistema *Fuzzy*. As regras desse sistema foram apresentadas no Capítulo 4, na Tabela 4.2. Foram realizadas simulações para as topologias de rede NSFNET e Torus. Para cada topologia, foram utilizados dois tipos de função pertinência para a definição da função custo: função pertinência triangular e trapezoidal. As simulações na topologia Anel não foram realizadas pelos motivos já citados.

5.2.1 – Resultados

Nesta subseção, são discutidos os resultados para as topologias de redes NSFNET e Torus, na comparação do algoritmo *Dijkstra* com o algoritmo que utiliza o sistema *Fuzzy*.

Topologia NSFNET

Na Figura 5.9, é mostrado o desempenho do algoritmo que utiliza o sistema *Fuzzy* de roteamento na topologia NSFNET. Os algoritmos para as funções pertinência triangular e

trapezoidal tiveram um desempenho melhor que o *Dijkstra*. Pode-se notar que a diferença entre os algoritmos é considerável até um certo nível de carga, chegando o *Fuzzy* a ser em alguns pontos mais de 50% melhor que o *Dijkstra*. Com aumento da carga de tráfego, essa diferença vai diminuindo, tornando o desempenho do sistema Fuzzy e do algoritmo Dijkstra quase que equiparável.

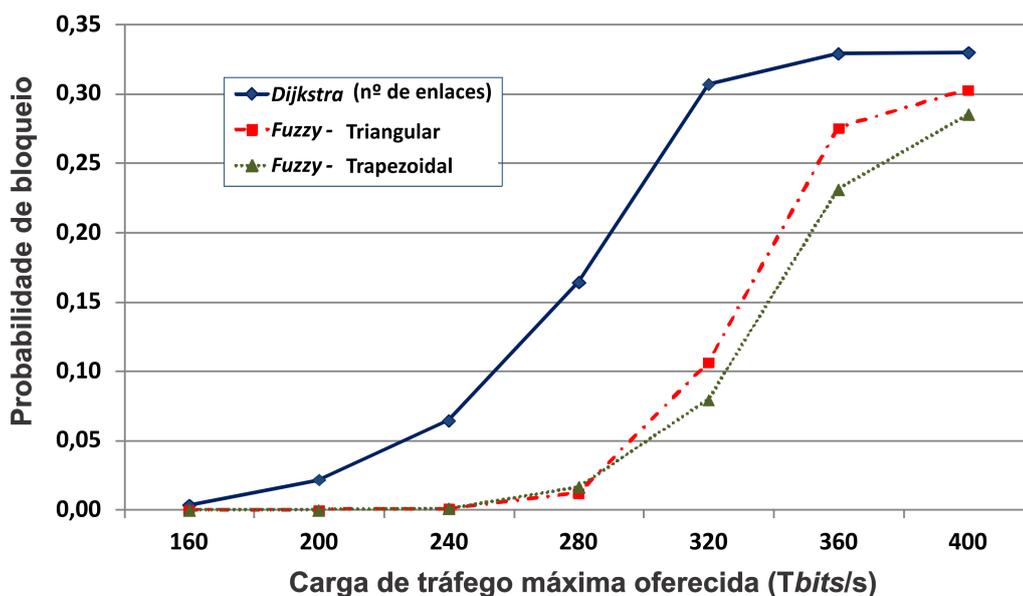


Figura 5.9 – Resultado da simulação: *Dijkstra versus Fuzzy* – Topologia NSFNET.

Topologia Torus

Na topologia Torus, apresentada na Figura 5.10, o algoritmo multicritério *Fuzzy* também foi melhor em comparação com o algoritmo *Dijkstra*. Porém, a diferença de desempenho foi menor do que o mostrado com a topologia NSFNET. A máxima diferença entre essas topologias foi de 5%, com o que se pode concluir que, para a topologia Torus, quando a quantidade de enlaces entre origem e destino é praticamente a mesma, a abordagem multicritério não é muito eficiente.

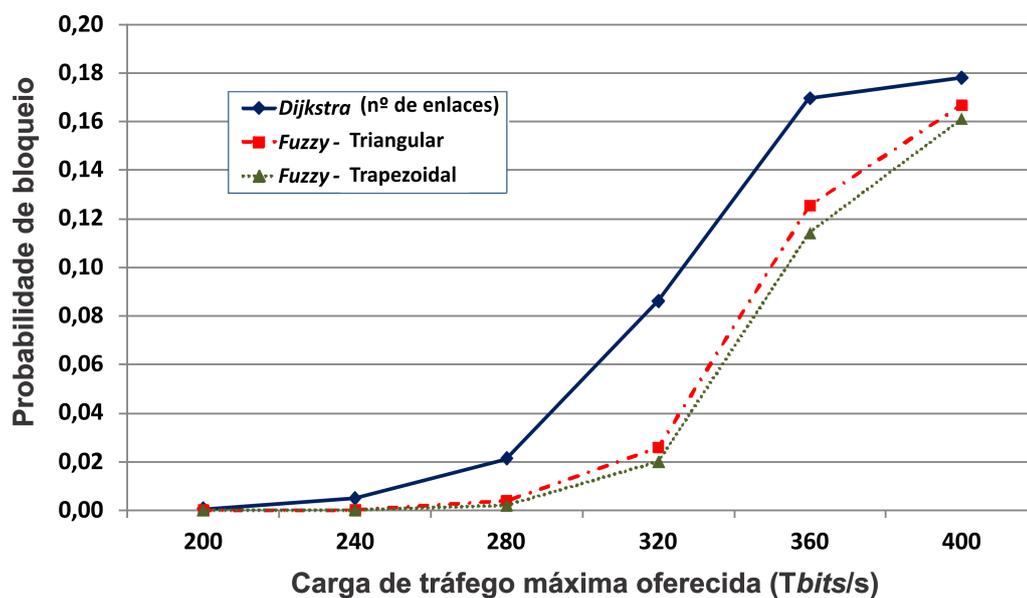


Figura 5.10 – Resultado da simulação: *Dijkstra versus Fuzzy* – Topologia Torus.

5.3 – Função Utilidade versus Fuzzy

Nesta Seção, são discutidos os resultados comparando o desempenho das duas abordagens multicritério, para as topologias de rede NSFNET e Torus.

Nas duas topologia, as três funções utilidade foram superiores as utilizadas com a lógica *Fuzzy*, com uma diferença mais acentuada na topologia de rede NSFNET, conforme observado nas Figuras 5.11 e 5.12. Pode-se creditar esse desempenho inferior do algoritmo *Fuzzy* à definição das regras utilizadas na Fuzzyficação, que são definidas pelo especialista. Por esse motivo, faz-se necessário realizar estudos e testes complementares, para poder encontrar um conjunto de regras que possam levar a um resultado mais eficiente desse algoritmo. Outro ponto que se deve considerar é a escolha da função pertinência. Há outras funções que não foram testadas neste trabalho e que podem levar a um melhor resultado.

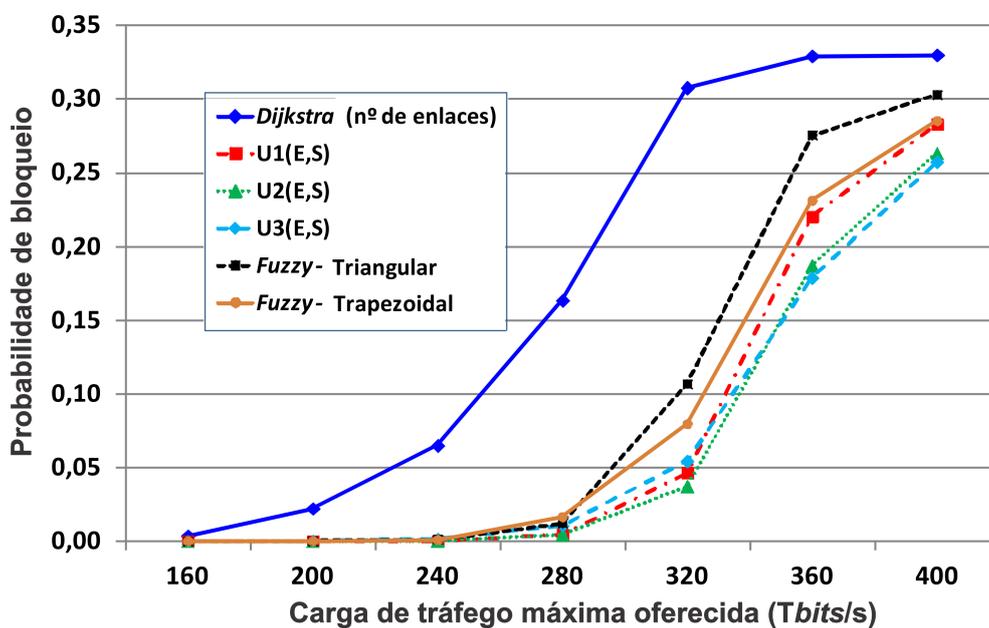


Figura 5.11 – Resultado da simulação: Função Utilidade versus Fuzzy – Topologia NSFNET.

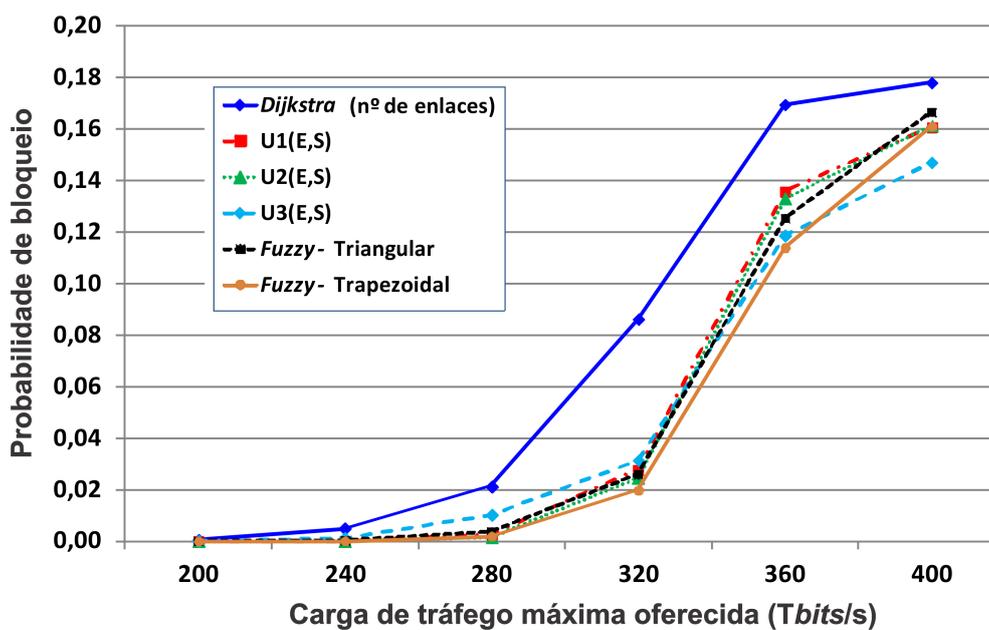


Figura 5.12 – Resultado da simulação: Função Utilidade versus Fuzzy – Topologia Torus.

Neste trabalho, foi implementado um algoritmo de roteamento para redes ópticas elásticas, utilizando uma nova proposta de função custo baseada em duas abordagens multicritério, a Teoria da Utilidade Multiatributo e a Lógica *Fuzzy*. A decisão da rota foi tomada levando-se em consideração dois critérios: quantidade de enlace na rota e quantidade de espaço disponível no espectro.

As simulações foram realizadas em três topologias de redes distintas, NSFNET (rede de área ampla com 14 nós e 22 enlaces), Torus (rede em malha com 9 nós e 18 enlaces) e Anel (rede clássica com 9 nós e 9 enlaces). Para cada topologia de rede, foram apresentados resultados de probabilidade de bloqueio *versus* carga, tanto para o roteamento com o algoritmo *Dijkstra*, quanto para o roteamento com as abordagens multicritério.

A flexibilidade e o fácil gerenciamento desses sistemas multicritério permitem uma eficiência maior em estratégias de roteamento mais complexas. Esta é uma perspectiva interessante, especialmente tendo em vista novas redes de transporte com uma grande variedade de dados diferentes como, vídeo, transferência de arquivos na ordem de *Gigabytes* etc. Toda estratégia de roteamento depende das exigências da rede e um algoritmo multicritério pode ser facilmente adaptado a diferentes critérios de roteamento.

Dentre os resultados obtidos, pode-se destacar que, na rede de topologia Anel, a utilização de multicritério na escolha de uma rota leva a uma probabilidade de bloqueio igual a obtida com o roteamento de critério único. Nas outras topologias, foi mostrado que as funções custos propostas neste trabalho tiveram um desempenho superior ao algoritmo de roteamento *Dijkstra*. Na abordagem MAUT, ressalta-se a importância de encontrar a atribuição de peso ideal aos critérios adotados na escolha da rota, sendo importante salientar que o tráfego da rede interfere pouco na definição dos pesos, já que os resultados para diferentes pesos com diferentes cargas de tráfego foram parecidos. Na abordagem *Fuzzy*, uma definição correta das regras que compõem o conjunto *Fuzzy* se faz necessária, visto que, essas regras têm um impacto direto no desempenho do algoritmo. Outro fator importante a salientar é a escolha da função pertinência, que também pode afetar a eficiência do algoritmo.

Outro ponto em destaque é o fato de que a abordagem multicritério necessita de uma rede com uma malha diversificada para poder ter um desempenho eficiente. As ferramentas que utilizam abordagens multicritério ainda não foram suficientemente exploradas na área de redes

ópticas elásticas. Esse é um campo em aberto que necessita de estudos e que no futuro poderá trazer bons resultados.

Foram realizados diversos testes, além dos apresentados neste trabalho. Com a teoria MAUT, foram atribuídos valores de pesos de forma aleatória e sem a utilização de um método matemático. Com a lógica *Fuzzy*, foram testados vários conjuntos de regras distintas. Os melhores resultados encontrados foram os apresentados neste trabalho. Apesar da obtenção de resultados satisfatórios, ainda não foi possível chegar ao ponto ótimo de roteamento. Identificar claramente a característica da rede responsável por um alto desempenho é necessário, por este motivo, haverá continuação dessa pesquisa em trabalhos futuros.

O enfoque principal deste trabalho foi o problema de roteamento com abordagem multicritério em redes ópticas elásticas. Porém, outras técnicas que compõem a transmissão em redes ópticas também têm influência no desempenho dessas redes, como técnicas de modulação e alocação de espectro. Para atingir tais objetivos, as redes tendem a evoluir visando flexibilidade, heterogeneidade e uso eficiente de seus recursos na conexão. As tecnologias de redes de transporte precisam ser adaptadas às novas necessidades, com novos requisitos de qualidade de serviço (QoS), dinamicidade de tráfego e necessidade de uso eficaz da largura de banda. Neste contexto, como continuação desse trabalho pretende-se investigar métodos eficientes para a resolução do problema de roteamento, modulação e alocação de espectro, conhecido na literatura como RMSA (*Routing, Modulation and Spectrum Assignment*), com o estudo de protocolos que permitam integrar essas tecnologias, além do uso de algoritmos genéticos para otimizar a largura de banda e minimizar as probabilidades de bloqueio em redes ópticas elásticas dinâmicas.

Como outras propostas de trabalhos futuros, pode-se considerar a utilização de outras técnicas para determinar os pesos dos critérios em MAUT como, por exemplo, o uso de algoritmos genéticos. Nos sistemas *Fuzzy*, as pesquisas podem continuar utilizando outras funções pertinências. Um estudo sobre a utilização de critérios diferentes dos que foram utilizados também pode ser realizado. A utilização de algoritmos genéticos para determinar uma função custo também é considerada uma proposta viável para abordagens multicritérios.

Referências Bibliográficas

- [1] CISCO, “Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2012 - 2017.” www.cisco.com/en/US/netsol/ns827/networking_solutions_white_papers_list.html, Maio 2013.
- [2] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, *Optical Networks: A Practical Perspective*. San Francisco, California, U.S.A.: Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 2 ed., 2002.
- [3] A. S. Garcia, L. G. B. Bueloni, R. S. Tessinari, and L. J. L. Farias, *MINICURSO: Arquiteturas de Plano de Controle para Redes Ópticas de Nova Geração Utilizando LSPs Hierárquicos*. Fortaleza, Ceará, Brasil: XXXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES, 2013.
- [4] X. Wan, N. Hua, and X. Zheng, “Dynamic Routing and Spectrum Assignment in Spectrum-Flexible Transparent Optical Networks,” *Journal Optical Communication Network*, vol. 2, Agosto 2012.
- [5] A. Jukan and K. Edwards, “Optical Control Plane for the Grid Community,” in *IEEE Communications Survey and Tutorials*, pp. 30–44, Setembro 2007.
- [6] W. Arnold, H. Hellendoorn, R. Seising, C. Thomas, and A. Weitzel, “Fuzzy Routing,” in *Fuzzy Sets and Systems* (E. Science, ed.), no. 85, pp. 131–153, 1997.
- [7] M. H. M. Paiva, “Aplicação de sistemas baseados em regras fuzzy para o roteamento em redes Ópticas,” dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo - SC, 2008.
- [8] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, and S. Matsuoka, “Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling technologies,” *IEEE Communication Magazine*, vol. 47, pp. 66–73, Novembro 2009.
- [9] A. F. Santos, R. C. Almeida, K. D. Assis, G. M. Durães, A. Soares, and W. F. Giozza, “Adaptação do Algoritmo BSR para Redes Ópticas SLICE,” *31^ª Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, 2013.

- [10] A. F. Santos, C. C. Santos, and G. M. D. e K. D. R. Assis, "Roteamento e Alocação de Espectro em Redes Ópticas: O Conceito SLICE," *XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Setembro 2012.
- [11] E. H. Mamdani and B. R. Gaines, *Fuzzy Reasoning and its Applications*, vol. 1. London, England: Academic Press Inc., 1981.
- [12] A. A. M. Saleh and J. M. Simmons, "Technology and Architecture to Enable the Explosive Growth of the Internet," *IEEE Commun*, vol. 49, pp. 126–132, Janeiro 2011.
- [13] P. M. Pereira, "Redes Ópticas elásticas," tech. rep., Escola de Engenharia de São Paulo – Universidade de São Paulo, 2013.
- [14] G. Z. anf M. de Leenheer and B. Mukherjee, "A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking," *IEEE Communications Surveys e Tutorials*, vol. 15, Abril 2013.
- [15] Z. Haiyi, Z. Wenyu, and W. Bingbing, "Considerations on Transport Networks Technologies Evolution," *Communications, China*, vol. 10, pp. 7–18, Abril 2013.
- [16] A. Jukan and J. Mambretti, "Evolution of Optical Networking Toward Rich Digital Media Services," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, pp. 855–871, Abril 2012.
- [17] A. A. M. Saleh and J. M. Simmons, "All-Optical Networking; Evolution, Benefits, Challenges, and Future Vision," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, pp. 1105–1117, Maio 2012.
- [18] F. G. B. ao, "Modelos de Algoritmo para o Projeto de Redes Ópticas WDM," Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, Setembro 2010.
- [19] W. Shieh and I. Djordjevic, *OFDM for Optical Communications*. Amsterdam: Academic Press, Elsevier, 2010.
- [20] R. Chang and R. Gibby, "A Theoretical Study of Performance of an Orthogonal Multiplexing Data Transmission Scheme," *IEEE Transactions on Communication Technology*, vol. 4, pp. 529–540, Agosto 1968.
- [21] F. K. G. Hoshino, "Estudo e Simulação da Modulação OFDM Aplicada em Redes Ópticas de Nova Geração," Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Limeira – SP, Fevereiro 2013.
- [22] Q. Yang, A. A. Aminand, and W. Shieh, *Impact of Nonlinearities on Fiber Optic Communications*, vol. 7. Nova Iorque: Springer, 2011.
- [23] R. Arthur, *Novas Propostas para Otimização de Receptores de TV Digital Baseados em OFDM em Ambientes de Redes de Frequência Única Regionais*. Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP, Limeira – SP, Fevereiro 2007.

- [24] W. Shieh, H. Bao, and Y. Tang, "Coherent optical OFDM: theory and design," *Optics Express*, vol. 16, no. 2, pp. 841–859, 2008.
- [25] E. G. da Silva and M. D. Miranda, "A Transmissão Digital com Múltiplas Portadoras," *Caderno de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica*, vol. 3, no. 1, pp. 79–92, 2003.
- [26] R. van Nee and R. Prasad, *OFDM For Wireless Multimedia Communications*. Norwood, MA, USA: Artech House Universal Personal Communications, 2000.
- [27] M. K. Ozdemir and H. Arslan, "Channel Estimation For Wireless OFDM Systems," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 9, pp. 18–48, Segundo Quadrimestre 2007.
- [28] N. Cvijetic, "OFDM for Next-Generation Optical Access Networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 4, pp. 384–398, Fevereiro 2012.
- [29] A. Sano, E. Yamada, H. Masuda, E. Yamazaki, T. Kobayashi, E. Yoshida, Y. Miyamoto, R. Kudo, K. Ishihara, and Y. Takatori, "No-Guard-Interval Coherent Optical OFDM for 100-Gbits/s Long-Haul WDM Transmission," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, pp. 3705–3713, Agosto 2009.
- [30] J. M. Tang, P. M. Lane, and K. A. Shore, "Transmission Performance of Adaptively Modulated Optical OFDM Signals in Multimode Fiber Links," *IEEE Photonics Technol. Lett*, vol. 18, pp. 205–207, Janeiro 2006.
- [31] S. C. J. Lee, F. Breyer, S. Randel, O. Ziemann, H. P. A. van den Boom, and A. M. J. Koonen, "Low-Cost and Robust 1-Gbits/s Plastic Optical Fiber Link Based on Light-Emitting Diode Technology," in *Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference*, pp. 1–3, Fevereiro 2008.
- [32] D. Hsu, C. Wei, H. Chen, W. Li, and J. Chen, "Cost-Effective 33-Gbits/s Intensity Modulation Direct Detection Multi-band OFDM LR-PON System Employing a 10-GHz-Based Transceiver," *Optics Express*, vol. 19, Agosto 2011.
- [33] O. Gonzalez, R. Perez-Jimenez, S. Rodriguez, J. Rabadan, and A. Ayala, "Adaptive OFDM System For Communications Over the Indoor Wireless Optical Channel," *IEEE Proceedings-Optoelectronics*, vol. 153, pp. 139–144, 2006.
- [34] N. Cvijetic, D. Qian, and J. Hu, "100 Gbits/s Optical Access Based on Optical Orthogonal Frequency-Division Multiplexing," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 48, pp. 70–77, Julho 2010.
- [35] The OASE project and research, "Survey of Next-Generation Optical Access System Concepts." http://www.ict-oase.eu/public/files/OASE_WP4_D4_1_29th_October_2010_v1_0.pdf, Acessado em: Maio 2014.

- [36] A. Klekamp, O. Rival, A. Morea, R. Dischler, and F. Buchali, "Transparent WDM Network with Bitrate Tunable Optical OFDM Transponders," in *Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference*, pp. 1–3, Março 2010.
- [37] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, and S. Matsuoka, "Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies," *IEEE Communication Magazine*, vol. 47, pp. 66–73, Novembro 2009.
- [38] A. Nag, M. Tornatore, and B. Mukherjee, "Optical Network Design With Mixed Line Rates and Multiple Modulation Formats," *IEEE/OSA Journal Lightwave Technology*, vol. 28, pp. 466–475, Fevereiro 2010.
- [39] S. Poole, S. Frisken, M. Roelens, and C. Cameron, "Bandwidth-Flexible ROADMs as Network Elements," in *Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference*, pp. 1–3, Março 2011.
- [40] M. Jinno, B. Kozicki, H. Takara, A. Watanabe, Y. Sone, T. Tanaka, and A. Hirano, "Distance-Adaptive Spectrum Resource Allocation in Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 48, pp. 138–145, Agosto 2010.
- [41] M. Klinkowski and K. Walkowiak, "Routing and Spectrum Assignment in Spectrum Sliced Elastic Optical Path Network," *IEEE Communication Letter*, vol. 15, pp. 884–886, Outubro 2011.
- [42] X. Wang, I. K. Q. Zhang, P. Palacharla, and M. Sekiya, "Blocking Performance in Dynamic Flexible Grid Optical Networks - What is the Ideal Spectrum Granularity?," in *37th European Conf. and Expo. on Optical Communications*, Novembro 2011.
- [43] A. Patel, P. N. Ji, J. P. Jue, and T. Wang, "Defragmentation of Transparent Flexible Optical WDM (FWDM) Networks," in *Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference*, pp. 1–3, Março 2011.
- [44] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. Varvarigos, "Spectrally/Bitrate Flexible Optical Network Planning," in *Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference*, pp. 1–3, Setembro 2010.
- [45] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. Varvarigos, "Dynamic bandwidth allocation in flexible OFDM-based networks," in *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*, pp. 1–3, Março 2011.
- [46] G. Shen and Q. Yang, "From Coarse Grid to Mini-Grid to Gridless: How Much can Gridless Help Contentionless?," *Optical Society of America*, 2011.
- [47] R. Dutta, A. E. Kamal, and G. N. Rouskas, *Traffic Grooming for Optical Networks: Foundations, Techniques, and Frontiers*. 2008.

- [48] T. Takagi, H. Hasegawa, K. Sato, Y. Sone, B. Kozicki, A. Hirano, and M. Jinno, "Dynamic Routing and Frequency Slot Assignment For Elastic Optical Path Networks that Adopt Distance Adaptive Modulation," in *Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference*, pp. 1–3, Março 2011.
- [49] C. D., *Internetworking with TCP/IP; Principles, Protocols, and Architectures*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1988.
- [50] H. Zang, J. P. Jue, and B. Mukherjee, "A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks," *Optical Networks Magazine*, Janeiro 2000.
- [51] P. R. L. Júnior, "Roteamento Adaptativo com Agregação de Tráfego em Redes Ópticas Dinâmicas," dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, Junho 2008.
- [52] C. S. R. Murthy and M. Gurusamy, *WDM optical networks: concepts, design, and algorithms*. New Jersey, 2002.
- [53] A. R. Mikler, V. Honavary, and J. S. Wong, "Utility-Theoretic Heuristics for Intelligent Adaptive Routing in Large Communication Networks," *Computer Science Technical Reports*, no. 104, 1995.
- [54] R. Steuer, *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application*. John Wiley & Sons, 1986.
- [55] S. F. Fernandes, *Desenvolvimento de Ferramentas de Apoio Multicritério à Decisão em Problemas de Localização*. Tese de doutorado, Universidade de Lisboa, Lisboa – Portugal, 2013.
- [56] J. E.C.T.Teixeira and M. C.N.Belderrain, "Aplicabilidade da Teoria de Utilidade Multicritério (MAUT) na Seleção de Sistemas de Ensino Brasileiro," *Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia*, 2011.
- [57] K. S. Helmann and R. F. M. Marçal, "Método Multicritério de Apoio à Decisão na Gestão da Manutenção: Aplicação do Método ELECTRE I na Seleção de Equipamentos Críticos para Processo," *Revista Gestão Industrial*, vol. 3, no. 1, pp. 123–134, 2007.
- [58] L. F. M. A. Gomes, M. C. G. Araya, and C. Carignano, *Tomada de decisões em cenários complexos*. São Paulo: Pioneira, 2004.
- [59] S. J. Russell and P. Norvig, *Inteligencia Artificial – Um Enfoque Moderno*, vol. 2. Madri – Espanha: Pearson Educación S.A., 2004.
- [60] M. Matos, "Ajuda multicritério à decisão – introdução." FEUP, 2005.

- [61] R. L. Keeney and H. Raiffa, *Decision with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-offs*, vol. 2. New York: Cambridge University Press, 1993.
- [62] L. F. A. M. Gomes and A. M. M. Moreira, “Da Informação à Tomada de Decisão: Agregando Valor Através dos Métodos Multicritério,” *Recitec*, vol. 2, no. 2, pp. 117–139, 1998. Recife.
- [63] K. T. Marshall and R. M. Oliver, *Decision Making and Forecasting*, vol. 1. McGraw Hill, 1995.
- [64] C. F. S. Gomes, “Principais Características da Teoria da Utilidade Multiatributo, e Análise Comparativa com a Teoria da Modelagem de Preferência e Teorias das Expectativas,” *Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, Setembro 1998.
- [65] R. T. Clemen, *Making Hard Decisions with Decision Tools*, vol. 2. Pacific Grove: CA: Duxbury Press, 2001.
- [66] B. Roy and D. Bouyssou, *Aide Multicritère à la Décision: Méthodes et cas*. Par: Económica, 1993.
- [67] G. Durães, A. Soares, W. Giozza, and J. S. Monteiro, “Roteamento Adaptativo de Menor Caminho para Redes Ópticas Translúcidas,” *XXX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, Maio 2012.
- [68] P. M. Moura, N. L. S. Fonseca, and R. Scaraficci, “Algoritmo de Roteamento e Atribuição de Espectro com Minimização de Fragmentação em Redes Ópticas Elásticas,” *32 Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, Maio 2014.
- [69] A. T. de Almeida, “Modelagem Multicritério Para Seleção de Intervalos de Manutenção Preventiva Baseada na Teoria da Utilidade Multiatributo,” *Pesquisa Operacional*, vol. 25, pp. 69–81, Janeiro–Abril 2005.
- [70] R. T. Clemen and T. Reilly, *Making Hard Decisions*, vol. 2. Duxbury Press, 2001.
- [71] L. A. Zadeh, “Fuzzy Sets,” *Information and Control*, vol. 8, pp. 338–353, 1965.
- [72] D. G. de Sousa Rignel, G. P. Chenci, and C. A. Lucas, “Uma Introdução a Lógica Fuzzy,” in *Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica* (R. O.-L. Uni-FACEF, ed.), vol. 1, 2011.
- [73] A. A. Marro, A. M. de Carvalho Souza, E. R. de Sousa Cavalcante, G. S. Bezerra, and R. de Oliveira Nunes, “Lógica fuzzy: Conceitos e aplicações.” Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN.
- [74] J. H. F. Cavalcanti, H. de Melo, C. da Rocha Souto, and M. T. Cavalcanti, *Lógica Fuzzy Aplicada às Engenharias*, vol. 1. João Pessoa – PB: www.logicafuzzy.com.br, 2012.

- [75] A. R. Rentería, *Estimação de Probabilidade Fuzzy a Partir de Dados Imprecisos*. PhD thesis, Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Setembro 2006.
- [76] F. A. C. Gomide, R. R. Gudwin, and R. Tanscheit, “Conceitos Fundamentais de Teoria de Conjuntos Fuzzy, Lógica Fuzzy e Aplicações,” *Proceedings of 6th International Fuzzy Systems Association World Congress–IFSA95, Tutorials*, Julho 1995.
- [77] M. C. Bechara, “Predição de falhas em redes de grades obs com plano de controle gmpls,” Master’s thesis, Universidade Federal do Pará, Belém - Pará, 2013.
- [78] J. Y. Yen, “Finding the k Shortest Loopless Paths in a Network,” *Manage. Sci.*, vol. 17, no. 11, pp. 712–716, 1971.