UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

*Algoritmo de Agrupamento Fuzzy C-Means para Aprendizado e
Tomada de Decisão em Redes Ópticas de Próxima Geração*

AUTORA: Tania Regina Tronco

ORIENTADORA: Prof^a. Dr^a. Mônica de Lacerda Rocha

COORIENTADOR: Prof. Dr. Amílcar Careli César

Tese apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São
Paulo, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutor em Ciências,
Programa de Engenharia Elétrica, na área
de Telecomunicações.

São Carlos

2015

Trata-se da versão corrigida da tese. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que
aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Tronco, Tania Regina
T853a Algoritmo de Agrupamento Fuzzy C-Means para
Aprendizado e Tomada de Decisão em Redes Ópticas de
Próxima Geração / Tania Regina Tronco; orientadora
Mônica de Lacerda Rocha; coorientador Amílcar Careli
César. São Carlos, 2015.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e Área de Concentração em
Telecomunicações -- Escola de Engenharia de São Carlos
da Universidade de São Paulo, 2015.

1. WDM. 2. Redes Ópticas Elásticas. 3. Redes
Ópticas Cognitivas. 4. Redes Ópticas Reconfiguráveis.
5. Fuzzy C-Means. 6. Plano de Controle Cognitivo. 7.
Algoritmo de Agrupamento FCM. 8. Redes Ópticas de
Próxima Geração. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **TANIA REGINA TRONCO**.

Título da tese: "Algoritmo de agrupamento Fuzzy C-Means para aprendizado e tomada de decisão em redes óticas de próxima geração".

Data da defesa: 31/08/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Profa. Dra. **Mônica de Lacerda Rocha (Orientadora)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovada

Prof. Titular **Amílcar Careli Cesar**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Prof. Dr. **Carmelo José Albanez Bastos Filho**
(Universidade de Pernambuco/UPE)

APROVADA

Profa. Dra. **Regina Melo Silveira**
(Escola Politécnica/EP-USP)

aprovada

Dr. **Miquel Garrich Alabarce**
(Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Telebrás/CPqD)

APROVADA

À minha filha Alessandra, ao meu marido Luís e à minha mãe Vilma

O homem nasceu para aprender, aprender tanto quanto a vida lhe permita

Guimarães Rosa

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade de desenvolver um trabalho em prol do desenvolvimento científico e tecnológico.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos, bem como todos os docentes e funcionários que o compõe, pela oportunidade de realização deste doutoramento.

À Prof.^a Dr.^a Mônica de Lacerda Rocha, pela orientação, dedicação e confiança depositados em mim no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Amílcar Careli César, pela coorientação, cujas diretrizes, sugestões e revisões foram de grande relevância para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Dr. Miquel G. Alabarce pelas discussões e sugestões que trouxeram *insights* significativos para o desenvolvimento do trabalho.

Ao pessoal do CPqD, em especial, Alberto Paradisi, Carlos Eduardo Salla, Antônio Carlos Bordeaux Rego, Cleida Aparecida Queiroz Cunha, Cláudia Piovesan Macedo, Débora Arcine, Moacir Giansante, Romulo Angelo Zanco Filho e Reginaldo Colnaghi Padovani com quem tenho interagido bastante nos últimos anos.

Aos colegas de departamento, Mariana Massimino Feres, Rafael Jales e Arturo Miranda, pela colaboração e troca de conhecimento.

Ao meu irmão, Prof. Dr. Mário Luiz Tronco, que sempre me incentivou a concretizar este sonho.

Ao meu marido, Luís Fernando de Avila, amigo, companheiro e amor, que me incentiva, apoia e ajuda em qualquer situação.

À minha querida filha Alessandra, meu bem mais precioso, pela paciência e compreensão nas horas em que eu não pude estar presente.

À Sheila Molchansky, pessoa muito querida, pelo apoio emocional neste período de trabalho intenso.

E, por fim, aos meus pais, Antônio (em memória) e Vilma, e irmãs, Aline e Gislaine, fundamentais na minha formação moral e profissional, pelo apoio e incentivo.

Resumo

TRONCO, T. R. **Algoritmo de Agrupamento Fuzzy C-Means para Aprendizado e Tomada de Decisão em Redes Ópticas de Próxima Geração**. 2015. 137f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

As redes ópticas têm evoluído de forma contínua dentro de um paradigma de aumento das taxas de transmissão e extensão dos enlaces, devido à demanda crescente de banda em função do crescimento do tráfego da Internet. Além disso, atualmente, diversas propostas vêm sendo implementadas visando torná-las mais dinâmicas e flexíveis. Uma destas propostas que atualmente está no âmbito de pesquisa e desenvolvimento refere-se às redes ópticas definidas por software (*Software Defined Optical Network*, SDON). Nas SDONs, o plano de controle é desacoplado do plano de encaminhamento de dados possibilitando que controladores remotos configurem em tempo real diversos parâmetros dos canais ópticos, tais como a taxa de transmissão, o formato de modulação, a largura do espectro, entre outros. Nestas redes, o sistema de controle torna-se bastante complexo, uma vez que diversos parâmetros têm que ser ajustados de forma dinâmica e autônoma, ou seja, com a mínima intervenção humana. O emprego de técnicas de inteligência computacional em tal controle possibilita a configuração autônoma dos parâmetros dos equipamentos com base em dados coletados por monitores de rede e o aprendizado, a partir de eventos passados, visando a otimização do desempenho da rede. Esta arquitetura de controle constitui um novo paradigma na evolução das redes ópticas, as denominadas *Redes Ópticas Cognitivas*. A escolha de uma técnica de inteligência computacional adequada para tomada de decisão em redes ópticas é importante para se obter vantagens no uso da cognição. Esta técnica deve possibilitar o aprendizado e ainda minimizar a complexidade computacional, uma vez que a configuração dos parâmetros da rede deve ocorrer em tempo real. Neste contexto, esta tese investiga o uso do algoritmo de agrupamento *Fuzzy C-Means* (FCM) para aprendizado e tomada de decisão em redes ópticas flexíveis de próxima geração. FCM possibilita a geração automática de regras com base na experiência adquirida no meio de operação (aprendizado) e a tomada de decisão a partir destas regras. Uma comparação de desempenho entre os algoritmos FCM e CBR (*Case-Based Reasoning*) é apresentada. O algoritmo CBR foi escolhido para esta comparação devido a ter sido utilizado recentemente, com sucesso, em redes ópticas cognitivas. Por fim, um conceito de rede óptica cognitiva é apresentado.

Palavras-chave: WDM, Redes ópticas cognitivas, Redes ópticas elásticas, Redes ópticas reconfiguráveis, Redes ópticas definidas por software, Plano de Controle Cognitivo, Fuzzy C-Means, Redes Ópticas de Próxima Geração.

Abstract

TRONCO, T. R. **Fuzzy C-Means Algorithm for Learning and Decision Making in Next Generation Optical Network.** 2015. 137f. Thesis (Ph.D.) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

Optical networks have evolved continuously increasing the transmission rate and the extension of links due to the increased bandwidth consuming. Moreover, currently, several proposals are under development to make the next generation optical network more dynamic and flexible. The term “flexible” refers to the ability of dynamically adjust the parameters of the optical network such as modulation format, transmission rate, optical bandwidth and others, according with the quality of transmission of each lightpath. In this scenario, a Software Defined Optical Network (SDON) emerges as a new optical network paradigm, where the control plane is decoupled from the data plane, enabling remote controllers to configure network equipment from different hardware vendors, which allows a degree of software programmability to the network. In SDON, the control plane needs to include functionalities to operate autonomously, i.e, with minimal human intervention. The use of the computational intelligence techniques in such control plane enables the autonomous operation and learning based on past events, in order to optimize the network performance. This architecture represents a new paradigm in the evolution of optical networks, resulting in so-called Cognitive Optical Networks. The choice of a computational intelligence technique for learning and decision-making in such optical networks is essential to bring advantages with the use of cognition. This technique should minimize the computational complexity, since the configuration of the network parameters must occur in real time. In this context, this thesis investigates the use of Fuzzy C-Means clustering algorithm (FCM) for learning and decision-making in the software defined optical networks context. FCM enables the automatic generation of rules, based on the experience gained during the network operation. Then, these rules are used by the control plane to take decisions about the lightpaths' configuration. A comparison of performance between the FCM and the CBR (Case-Based Reasoning) algorithm. CBR algorithm was chosen because it has been successfully used in cognitive optical networks. Finally, we propose a concept for optical cognitive network.

Keywords: WDM, Cognitive optical networks, Elastic optical networks, Reconfigurable optical networks, Software defined optical networks.

Sumário

Capítulo 1 Introdução	24
1.1. Plano de Controle para Redes Ópticas de Próxima Geração	32
1.2. Redes Ópticas Cognitivas	36
1.3. Técnicas de Inteligência Computacional	39
1.3.1. Raciocínio Baseado em Casos	40
1.3.2. Redes Neurais Artificiais	40
1.3.3. Algoritmos Genéticos	41
1.3.4. Fuzzy C-Means	42
1.4. Contribuições da Pesquisa	43
1.5. Organização do Trabalho	43
Capítulo 2 Conceitos e Arquiteturas de Redes Cognitivas	45
2.1. Conceito de Rádio Cognitivo	46
2.2. Conceito de Rede Cognitiva	48
2.3. Arquiteturas de Redes Cognitivas	53
2.3.1. BICA (<i>Biologically Inspired Cognitive Architecture</i>)	53
2.3.2. CogProt (<i>Cognitive Configuration and Optimization of Communication Protocols</i>)	56
2.3.3. Arquitetura de Rádios Cognitivos	58
2.3.3.1. PBM (<i>Policy-Based Management of Radio Resources and Autonomic Computing</i>)	58
2.3.3.2. E^3 (<i>End-to-End Efficiency</i>)	62
2.3.4. Arquiteturas de Redes Ópticas Cognitivas	66
2.3.4.1. Cognition (<i>Cognitive Optical Network Architecture</i>)	67
2.3.4.2. CHRON	70
2.4. Padronização	84
2.5. Considerações Finais sobre os Conceitos e Arquiteturas de Redes Cognitivas	85
Capítulo 3 Fuzzy C-Means	87
3.1. Lógica Fuzzy	87
3.2. Métodos de Agrupamento	92
3.2.1. Medidas de Similaridade	94

3.3.	Algoritmo FCM	94
3.3.1.	Testes de Validação	97
3.4.	Algoritmo CBR.....	98
Capítulo 4 Conceito de Rede Óptica Cognitiva e Estudo de Caso		100
4.1.	Conceito de Rede Óptica Cognitiva.....	100
4.2.	Estudo de Caso.....	102
4.2.1.	Etapas do Algoritmo FCM.....	102
4.3.	Simulações dos Enlaces Ópticos para Coleta de Dados	103
4.4.	Pré-Processamento das Informações	109
4.5.	Agrupamento dos dados.....	110
4.6.	Geração das Regras.....	113
4.7.	Aplicação do Algoritmo FCM	115
4.8.	Considerações Finais	117
Capítulo 5 Resultados Numéricos e Comparação de Desempenho entre os Algoritmos FCM e CBR.....		118
5.1.	Passos do Algoritmo CBR	118
5.2.	Análise da Complexidade Temporal do CBR e FCM	119
5.3.	Resultados das Simulações	121
5.4.	Arquitetura do Plano de Controle das NG-ONs com o uso do FCM.	125
5.5.	Considerações Finais	127
Capítulo 6 Conclusões		128
6.1.	Trabalhos Futuros	129
6.1.1.	Inclusão de novos parâmetros do sistema óptico no algoritmo FCM.....	129
6.1.2.	Comparação com outras técnicas de IC	129
6.1.3.	Criação de uma arquitetura <i>Cross-Layer</i> e distribuída	130
6.1.4.	Validação do algoritmo FCM em testbed experimental SDON	130
6.2.	Artigos publicados em periódicos.....	130
6.3.	Artigos publicados em congressos e conferências.....	130
Referências Bibliográficas		131

Lista de Figuras

<i>Figura 1– Evolução das taxas de transmissão dos sistemas de comunicações ópticas em função de inovações tecnológicas. Adaptado de [1].</i>	24
<i>Figura 2– Eficiência Espectral versus Alcance dos Enlaces.</i>	26
<i>Figura 3– Modulações N-WDM e O-OFDM. Adaptada de [7].</i>	27
<i>Figura 4– Graus de Flexibilidade das NG-ONs. Adaptada de [11].</i>	29
<i>Figura 5– Flexibilidade dos ROADMs.</i>	30
<i>Figura 6– Alocação Flexível de Espectro. Adaptada de [4].</i>	31
<i>Figura 7 – Arquiteturas dos Equipamentos de Rede. Modelo atual (a) e modelo programável, aberto (b) [14].</i>	33
<i>Figura 8– Plano de Controle OF Unificado. Adaptada de [15].</i>	35
<i>Figura 9– Extensão do OF para Redes Ópticas de Próxima Geração. Adaptada de [16].</i>	36
<i>Figura 10– Modelo de Rede Cognitiva.</i>	39
<i>Figura 11– Sistema de Rádio Cognitivo de Mitola [33].</i>	46
<i>Figura 12– Ciclo Cognitivo [33].</i>	47
<i>Figura 13– Estrutura da Rede Cognitiva [38].</i>	49
<i>Figura 14 – Plano de Conhecimento [39].</i>	51
<i>Figura 15– Modelo de Rede Cognitiva [39].</i>	51
<i>Figura 16– Arquitetura Cognitiva BICA [40].</i>	54
<i>Figura 17– Componentes Chave da Cognição Humana [24].</i>	55
<i>Figura 18– Componentes da Arquitetura CogProt [42].</i>	56
<i>Figura 19– Laço de Controle da CogProt [42].</i>	57
<i>Figura 20– Laço de Controle da PBM [43].</i>	59
<i>Figura 21– Operação da Rede Cognitiva [43].</i>	60
<i>Figura 22– Metodologia de Configuração Cognitiva[43].</i>	61
<i>Figura 23– Arquitetura E³[44].</i>	62
<i>Figura 24– Estrutura do Sistema de Gerenciamento Cognitivo [44].</i>	64
<i>Figura 25– Resultados de Simulação do DSNMP (Adaptado de [44]).</i>	66
<i>Figura 26– Arquitetura Cognition [24].</i>	67
<i>Figura 27– Arquitetura Multi-Domínios Cognition [24].</i>	68
<i>Figura 28– Arquitetura de um Nó Cognitivo da Cognition [24].</i>	70
<i>Figura 29– Arquitetura CHRON [45].</i>	71
<i>Figura 30– Blocos Funcionais da Arquitetura Centralizada CHRON [47].</i>	72
<i>Figura 31–Arquitetura Centralizada CHRON [47].</i>	74
<i>Figura 32– Blocos Funcionais da Arquitetura CHRON Distribuída [47].</i>	76
<i>Figura 33–Arquitetura Distribuída CHRON [47].</i>	77
<i>Figura 34– Ciclo Cognitivo da Arquitetura CHRON [47].</i>	78
<i>Figura 35 – Sistema Cognitivo da CHRON [47].</i>	80
<i>Figura 36 – Fator Q dos lightpaths em função de seus comprimentos [48].</i>	82
<i>Figura 37– Comparação de Desempenho dos Algoritmos Cognitivos da CHRON e Não Cognitivos [45].</i>	83
<i>Figura 38 – Topologia de Teste. Adaptada de [22].</i>	83
<i>Figura 39 – Diagrama de Tempo com a redução do tempo de recuperação de falhas. Adaptada de [22].</i>	84
<i>Figura 40 – Exemplos de Funções de Pertinência Lógica Fuzzy.</i>	88
<i>Figura 41 – Arquitetura básica de um controlador Fuzzy. Adaptado de [60].</i>	88
<i>Figura 42 – Probabilidade de bloqueio em função do atraso diferencial de grupo.</i>	91

<i>Figura 43 – Exemplo de Agrupamento de Dados. Adaptado de [66].</i>	92
<i>Figura 44 – Arranjo da Simulação no Optisystem.</i>	104
<i>Figura 45 – Algoritmos de Processamento Digital de Sinais.</i>	107
<i>Figura 46 – SNR_b versus BER.</i>	108
<i>Figura 47 – Funções de Pertinência de Entrada e Saída do FCM.</i>	114
<i>Figura 48 – Topologia da rede e sua representação, Matriz transmat .</i>	115
<i>Figura 49 – Eventos de Alocação e Liberação de Conexões.</i>	116
<i>Figura 50 – Pseudocódigo do FCM.</i>	117
<i>Figura 51– Pseudocódigos do FCM e CBR.</i>	119
<i>Figura 52– Tempos de Execução do FCM e CBR para $N=100$.</i>	121
<i>Figura 53 – Tempos de Execução do CBR em função de N.</i>	123
<i>Figura 54 – Tempos de Execução do FCM em função de N.</i>	123
<i>Figura 55 – Relação entre os Tempos de Execução CBR e Fuzzy em função de N.</i>	124
<i>Figura 56 – Plano de Controle NG-ONs.</i>	125
<i>Figura 57 – Funções de Pertinência de Entrada e Saída do AC_2.</i>	126

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1– Exemplo do Uso de O-OFDM.</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 2– Uso de Grade Espectral Flexível.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 3– Hierarquia de Arquiteturas Cognitivas [41].</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 4– Dados de Configuração da Simulação DP-QPSK.</i>	<i>104</i>
<i>Tabela 5– Dados de Configuração da Simulação DP-16 QAM.</i>	<i>105</i>
<i>Tabela 6– Dados Obtidos na Simulação dos Enlaces.</i>	<i>109</i>
<i>Tabela 7– Dados Processados.</i>	<i>110</i>
<i>Tabela 8– Dados de Entrada FCM.</i>	<i>111</i>
<i>Tabela 9– Dados de Saída FCM.</i>	<i>112</i>
<i>Tabela 10– Relação entre os Tempos de Execução CBR e FCM em função de D</i>	<i>122</i>

Lista de Siglas

AG	<i>Algoritmo Genético</i>
API	<i>Application Programmable Interface</i>
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
BER	<i>Bit-Error Ratio</i>
BVT	<i>Bandwidth Variable Transceivers</i>
CAGR	<i>Compound Annual Growth Rate</i>
CBR	<i>Case-Based Reasoning</i>
CD	<i>Chromatic Dispersion</i>
CDL	<i>Cognition Description Language</i>
CMA	<i>Context Matching Algorithm</i>
CKI	<i>Control Knowledge Interface</i>
CMI	<i>Connection and Management Interface</i>
CN	<i>Cognitive Network</i>
CON	<i>Cognitive Optical Network</i>
CP	<i>Control Plane</i>
CR	<i>Cognitive Radio</i>
DCF	<i>Dispersion-Compensating Fiber</i>
DGD	<i>Differential Group Delay</i>
DPSK	<i>Differential Phase Shift Keying</i>
DQPSK	<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i>
DP- QPSK	<i>Dual Polarization – Quaternary Phase Shift Keying</i>
DSP	<i>Digital Signal Processing</i>
EDFA	<i>Erbium Dopped Fiber Amplifiers</i>

EON	<i>Elastic Optical Network</i>
EOP	<i>Elastic Optical Path</i>
FCM	<i>Fuzzy C-Means</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FM	<i>Frequency Modulation</i>
FWM	<i>Four-Wave Mixing</i>
GMPLS	<i>Generalized Multiprotocol Label Switching</i>
GTED	<i>Global Traffic Engineering Database</i>
GPPD	<i>Global Physical Parameter Database</i>
IC	Inteligência Computacional
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
KB	<i>Knowledge Base</i>
KP	<i>Knowledge Plane</i>
LMP	<i>Link Management Protocol</i>
MKI	<i>Management Knowledge Interface</i>
MLR	<i>Mixed Line Rate</i>
MMF	<i>Multiple Modulation Formats</i>
MP	<i>Management Plane</i>
NG-ON	<i>Next Generation Optical Network</i>
NG-ROADM	<i>Next Generation -Reconfigurable OADM</i>
OA	<i>Optical Amplifier</i>
OADM	<i>Optical Add/Drop Multiplexer</i>
OF	<i>Open Flow</i>
O-OFDM	<i>Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OOK	<i>On/Off Keying</i>
OPM	<i>Optical Performance Monitoring</i>
OSPF-TE	<i>Open Shortest Path First - Traffic Engineering</i>

OSNR	<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i>
OXC	<i>Optical Cross-Connect</i>
PBM	<i>Policy-Based Management</i>
PMD	<i>Polarization-mode dispersion</i>
PSK	<i>Phase-Shift Keying</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QoT	<i>Quality of Transmission</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
RNA	<i>Rede Neural Artificial</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RKRL	<i>Radio Knowledge Representation Language</i>
ROADM	<i>Reconfigurable OADM</i>
RSVP-TE	<i>ReSerVation Protocol – Traffic Engineering</i>
RWA	<i>Routing and Wavelength Assignment</i>
RWSA	<i>Routing, Wavelength and Spectrum Assignment</i>
SAN	<i>Software Adaptive Network</i>
SDC	<i>Sistema de Decisão Cognitivo</i>
SDON	<i>Software Defined Optical Network</i>
SDN	<i>Software Defined Network</i>
SE	<i>Spectral Efficiency</i>
SDR	<i>Software Defined Radio</i>
SDM	<i>Spatial Division Multiplexing</i>
SOM	<i>Self-Organization Maps</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
TX	<i>Transmissor</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>

WSS

Wavelength Selective Switch

XPM

Cross-Phase Polarization

Capítulo 1

Introdução

Historicamente as redes ópticas têm evoluído de forma contínua dentro de um paradigma de aumento das taxas de transmissão e extensão dos enlaces. Na década de 1980, os sistemas ópticos basicamente acompanharam o crescimento da capacidade dos sistemas de transmissão baseados em multiplexação por divisão no tempo (*Time Division Multiplexing*, *TDM*), aumentando as taxas de dezenas de Mbit/s até uns poucos Gbit/s, conforme ilustra a Figura 1[1]. Porém, na década de 1990, houve um salto tecnológico com a introdução dos amplificadores ópticos com fibra óptica dopada com Érbio (*Erbium Dopped Fiber Amplifiers*, EDFAs), novos tipos de fibras ópticas, técnicas e dispositivos ópticos para compensar efeitos de dispersão e não-linearidades das fibras. Isto permitiu o surgimento dos sistemas de multiplexação por divisão de comprimentos de onda (*Wavelength Division Multiplexing*, *WDM*), isto é, a transmissão simultânea de vários comprimentos de onda numa única fibra óptica. Desde então, as redes ópticas evoluíram de sistemas WDM ponto-a-ponto com taxas de 2,5 Gbit/s por canal, para sistemas de 10 Gbit/s, 40 de Gbit/s e 100 Gbit/s que representam hoje a tecnologia dominante nas redes ópticas de entroncamento [2].

Figura 1– Evolução das taxas de transmissão dos sistemas de comunicações ópticas em função de inovações tecnológicas. Adaptado de [1].

De acordo com [3], o tráfego IP global irá crescer aproximadamente três vezes no período de 2014-2019, a uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 23%, principalmente devido ao uso intensivo de telefones celulares, *tablets*, TVs com internet e vídeos de alta definição. Com isto, os sistemas de comunicação óptica estão sendo continuamente pressionados para atender a esta nova demanda e novos desafios tecnológicos têm que ser superados, tais como: o desenvolvimento de novos formatos de modulação, de técnicas de detecção coerente, de métodos de controle dos efeitos de dispersão e não linearidades nas fibras e da multiplexação espacial (*Spatial Division Multiplexing, SDM*), envolvendo fibras com múltiplos núcleos e/ou múltiplos modos (ver Figura 1).

Historicamente, as transmissões por fibra óptica utilizavam técnicas de modulação direta sobre a fonte de luz (laser), do tipo "liga-desliga" (*On-Off Keying, OOK*). Entretanto, à medida que a taxa cresce para 40 ou mais Gbit/s, formatos de modulação mais sofisticados passam a ser requeridos para superar os novos desafios que surgiram, dentre eles o de melhorar a eficiência espectral (*Spectral Efficiency, SE*). A modulação em fase do tipo QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*), por exemplo, é uma técnica derivada do PSK (*Phase Shift Keying*) na qual são utilizadas informações de fase e quadratura da onda portadora para modular o sinal de informação. No QPSK, cada símbolo corresponde a dois bits: 00, 01, 10, 11 e, para representá-los, são utilizados quatro valores de fase diferentes, por exemplo: 45° , 135° , 225° e 315° , cada um deles correspondendo a uma das sequências de dois bits. Com isto, a taxa de transmissão é duplicada em relação ao OOK e a eficiência espectral dos sistemas ópticos evoluiu de 0,5 bit/s/Hz (sistemas OOK) para 1 bit/s/Hz (sistemas QPSK), tornando possível a transmissão de sinais a 40 Gbit/s numa grade espectral WDM fixa de 50 GHz, que é um dos espaçamentos padronizados pela recomendação ITU-T G.694.1 [4]. Para sistemas operando a 100 Gbit/s, é necessária uma eficiência espectral de 2 bits/s/Hz para garantir a ocupação espectral de um sinal óptico modulado na mesma grade de 50 GHz. Para isto, os sistemas de transmissão óptica à 100 Gbit/s têm adotado o formato de modulação DP-QPSK (*Dual Polarization – Quaternary Phase Shift Keying*), sugerido pela OIF (*Optical Internetworking Forum*). O DP-QPSK utiliza modulação em fase, como no QPSK, gerando duas saídas defasadas de 90° (fase e quadratura). A seguir, estas duas saídas são rotacionadas ortogonalmente entre si e multiplexadas num feixe único. O DP-QPSK induz nos sistemas ópticos a necessidade de detecção coerente, devido à necessidade estrita de recuperação da fase do sinal na recepção do sinal. O uso da detecção coerente, por sua vez, possibilita a recuperação do sinal no domínio elétrico, tornando possível o uso de algoritmos de processamento digital de sinais (*Digital Signal Processing, DSP*) na recepção. Estes algoritmos são empregados para minimização dos efeitos de degradação lineares e não lineares do canal de comunicação, eliminando-

se assim os compensadores de linha utilizados (dispersão cromática e de polarização), tornando os sistemas WDM mais robustos e reduzindo os custos de implantação e manutenção. Atualmente, estruturas de transmissão e recepção, baseadas em sistemas coerentes, são capazes de suportar taxas de transmissão desde 100 Gbit/s até dezenas de Tbit/s [5]. Outra técnica empregada para aumento de capacidade é a modulação QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). Nesta modulação, além da informação de fase e quadratura empregada no QPSK, o mapeamento dos símbolos considera também a distância dos mesmos com relação à origem dos quadrantes, ou seja, a amplitude. Com isto, aumenta o número de possibilidades de símbolos, com relação ao QPSK. Por exemplo, o 16 QAM permite o transporte de 4 bits por símbolo, quadruplicando a taxa de transmissão em relação ao OOK e aumentando ainda mais a eficiência espectral. É importante ressaltar que à medida que os formatos de modulação são de mais alta ordem, a eficiência espectral aumenta, mas a OSNR necessária para a recuperação do sinal no receptor óptico coerente também aumenta. No entanto, à medida que a eficiência espectral aumenta, o alcance dos enlaces diminui como ilustra a Figura 2.

Figura 2– Eficiência Espectral versus Alcance dos Enlaces.

As técnicas de multiplexação N-WDM (*Nyquist-WDM*) e O-OFDM (*Optical-Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) também estão sendo empregadas nas redes ópticas. A multiplexação N-WDM utiliza subportadoras ópticas com espectro de frequência retangular, próximo ao limite de *Nyquist* para interferência intersimbólica (Figura 3). Isto é possível devido à redução do sinal óptico à largura espectral mínima necessária para transmitir o sinal, o que corresponde à frequência de *Nyquist*.

Estas subportadoras são multiplexadas em frequência com espaçamento mínimo igual ao da taxa de símbolos, mas permitindo o uso de frequência de guarda, o que compromete a otimização da eficiência espectral [6]. Esta técnica é a mais adotada em implementações práticas de transceptores de sinais modulados a 400 Gbit/s em combinação com formatos de modulação N-QAM.

Figura 3– Modulações N-WDM e O-OFDM. Adaptada de [7].

Na multiplexação O-OFDM, um feixe de dados de alta taxa é transmitido em múltiplos canais ortogonais paralelos, denominados subportadoras, cada uma transportando uma taxa de dados menor. No domínio espectral, a condição de ortogonalidade entre as múltiplas subportadoras é satisfeita quando as suas frequências centrais são espaçadas de n/T_s , onde n é um número inteiro e T_s é a duração do símbolo [8]. Este esquema de modulação tem as vantagens de ser mais tolerante aos efeitos de degradação do canal óptico, pois transmite múltiplos feixes paralelos a taxas menores, possui alta eficiência espectral e ainda suporta o mapeamento de diferentes serviços, em paralelo, nas suas subportadoras, permitindo a (auto) reconfiguração do transmissor para o transporte de múltiplas taxas num mesmo comprimento de onda. Devido a estas características, o O-OFDM tem se tornado atrativo para comunicações ópticas a taxas superiores a 400 Gbit/s [9][10]. A Tabela 1 ilustra dois exemplos do emprego da modulação O-OFDM.

Tabela 1– Exemplo do Uso de O-OFDM.

Demanda em Gbit/s	Taxa de Símbolos em Gbaud/s	Formato de Modulação	Número de sub-portadoras OFDM
448	28	DP-16 QAM	2
448	28	DP-QPSK	4

Soluções baseadas em múltiplas portadoras como a O-OFDM e N-WDM têm sido empregadas para implementação de supercanais ópticos. No exemplo da Figura 3, um supercanal é construído através do agrupamento lado a lado de 3 canais ópticos. Estes canais são transmitidos de forma agrupada na rede.

Com relação ao aumento da extensão dos enlaces ópticos, este tem sido obtido através do uso de amplificadores ópticos de potência, do tipo Raman, ou híbridos (EDFA-Raman), e/ou ainda empregando códigos corretores de erro (*Forward Error Correction*, FEC), de modo a melhorar a robustez da transmissão óptica [5].

Os elementos chave das NG-ONs são o transceptor flexível ou, como é mais conhecido mesmo na língua portuguesa, *transponder* flexível, e o ROADM (*Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer*). O *transponder* flexível, também denominado de *transponder* de largura de banda variável (*Bandwidth Variable Transceiver*, BVT) [10], possibilita a configuração dinâmica de diferentes taxas de transmissão, diferentes formatos de modulação, número de subportadoras, potência óptica, esquemas de FEC e comprimento de onda, visando satisfazer diferentes demandas de tráfego e também eventuais degradações do meio físico. Assim, é possível selecionar a taxa de transmissão e o formato de modulação que apresente a melhor relação custo benefício numa determinada configuração do enlace e, dinamicamente, reconfigurá-lo em função da variação da demanda de tráfego e/ou das mudanças nas condições da rede em tempo real.

A Figura 4 ilustra os diferentes graus de flexibilidade que podem ser empregados nos *transponders* das redes ópticas de próxima geração (*Next Generation Optical Network*, NG-ON).

Figura 4– Graus de Flexibilidade das NG-ONs. Adaptada de [11].

Além disso, os BVTs também podem ser “fatiados” em vários “*transponders* virtuais” de forma a atender diferentes aplicações em paralelo. Por exemplo, um BVT de 400 Gbit/s pode ser fatiado em três *transponders* virtuais de 100 Gbit/s, 100 Gbit/s e 200 Gbit/s, cada um provendo um serviço de rede dedicado. Os BVTs são tecnologias chave para a virtualização das redes ópticas [12].

Já os ROADMs são comutadores ópticos com a habilidade de remotamente e dinamicamente comutarem tráfego em sistemas WDM. Os ROADMs utilizam dispositivos do tipo WSSs (*Wavelength Selective Switches*) e estes dispositivos suportam canais ópticos de largura de banda de variável, provendo flexibilidade à rede. Atualmente, existem basicamente dois tipos de ROADMs, os de linha e os *Add/Drop*. Os ROADMs de linha proveem conectividade de/para outros ROADMs na rede e os ROADMs do tipo *Add/Drop* possibilitam a inserção e derivação de caminhos ópticos localmente, em cada comutador. A arquitetura dos ROADMs *Add/Drop* evoluiu nos últimos anos para os NG-ROADMs (*Next Generation ROADM*), que possuem três novas funcionalidades, denominadas CDC (colorless, Directionless e Contentionless), mostradas na Figura 5 e descritas a seguir.

Figura 5– Flexibilidade dos ROADMs.

- **Incolor (*Colorless*)**

O sinal óptico pode estar em qualquer comprimento de onda ou cor, uma vez que o ROADM emprega lasers sintonizáveis. Assim, é possível selecionar qualquer comprimento de onda para o transporte, permitindo assim que o algoritmo de engenharia de tráfego otimize a utilização dos recursos da rede.

- **Sem direção Fixa (*Directionless*)**

O sinal óptico ligado a qualquer porta de entrada da matriz de comutação do ROADM, pode ser direcionado para qualquer porta de saída.

- **Sem Contenção (*Contentionless*)**

Esta característica possibilita que dois canais ópticos que utilizem o mesmo comprimento de onda, mas com informações diferentes, possam ser recebidos ou enviados simultaneamente de/para diferentes portas de entrada/saída.

Além disso, os NG-ROADMs proveem suporte à grade espectral flexível. Nos sistemas WDM atuais é definida uma grade espectral com espaçamento fixo e uniforme entre canais, sendo a grade de 50 GHz a mais comum. No entanto, o espaçamento em *slots* fixos de 50 GHz, para a faixa do espectro

de 1530 a 1565 nm (Banda C), não tem mais se mostrado adequado para taxas de bits superiores a 100 Gbit/s. Em altas taxas é muito difícil obter uma elevada eficiência espectral em transmissões em longas distâncias. Dessa forma, é importante o emprego de NG-ROADMs que se adaptem às reais necessidades de tráfego e que possibilitem a ocupação do espectro de forma flexível. As redes capazes de ajustar suas janelas espectrais são também denominadas de elásticas (*Elastic Optical Network*, EON).

A recomendação ITU-T G.694.1 [4] suporta o espaçamento flexível entre canais, além do fixo, permitindo com granularidade de 12,5 GHz, com habilidade de agregar múltiplos 12,5 GHz em supercanais ópticos. Isto permite o uso eficiente e flexível do espectro óptico para maximizar a capacidade. A relação $193,1 + n \times 0,00625$ (THz) é utilizada para calcular a frequência central de um slot de frequências, enquanto a relação $12,5 \text{ GHz} \times m$ corresponde à largura do slot, onde n é um número inteiro e m é um número positivo e inteiro. Exemplos de grade flexível utilizando esta recomendação estão ilustrados na Figura 6, onde dois slots de 50 GHz e dois slots de 75 GHz são alocados no espectro. Os valores de n e m para cada canal estão indicados na Figura 6. O intervalo de frequências entre 193,125 THz e 193,18125 THz é deixado como banda de guarda entre os dois conjuntos de canais. A Tabela 2 mostra um exemplo de utilização da grade flexível. Assim, nos *transponders* flexíveis e NG-ROADMs, obtém-se uma alta eficiência espectral, pois se utiliza a porção do espectro exatamente igual à requerida pelo canal óptico, como mostra a Tabela 2.

Figura 6– Alocação Flexível de Espectro. Adaptada de [4].

Tabela 2– Uso de Grade Espectral Flexível.

Demanda em Gbit/s	Taxa de Símbolos Gbaud/s	Formato de Modulação	Largura de Banda do Canal (GHz)	Número de subportadoras OFDM	Grade Flexível
448	28	DP-16 QAM	35	2	75 GHz (6 slots de 12,5 GHz)
448	28	DP-QPSK	35	4	150 GHz (12 slots de 12,5 GHz)

No entanto, num cenário dinâmico, onde conexões são estabelecidas e liberadas aleatoriamente, lacunas ou "*gaps*" podem ser formadas no espectro gerando uma fragmentação no mesmo [6], similar à fragmentação de memória que ocorre nos computadores pessoais. Para resolvê-la, diversos mecanismos de desfragmentação do espectro têm sido investigados, dentre estes, os principais são: reotimização, “make-before-break”, “push-and-pull” e “hop tuning”. O de reotimização visa compactar os *slots* utilizados em *slots* contíguos de forma a aumentar a disponibilidade de *slots* vazios para novas conexões. O “make-before-break” procura atender conexões bloqueadas procurando *slots* vazios entre os slots ocupados. Se estes *slots* forem encontrados, são primeiramente reservados pelo plano de controle e, a seguir, a conexão é realocada para esta porção do espectro, daí a denominação “make-before-break”. Por fim, o “push-and-pull” e o “hop tuning” visam atender conexões conflitantes através do deslocamento do espectro destas conexões sobre slots vazios e contíguos. No “push-and-pull” este deslocamento não ocasiona interrupção das conexões, pois inicialmente o espectro é alargado e depois deslocado. Já no “hop tuning”, é utilizada a técnica de comutação sem perda de bits, na qual a conexão é interrompida por um tempo, durante a fase de reconfiguração [6].

1.1. Plano de Controle para Redes Ópticas de Próxima Geração

Para suportar todos os graus de elasticidade e flexibilidade das redes ópticas de próxima geração, é necessário um plano de controle com funcionalidades avançadas. Neste sentido, duas abordagens têm sido consideradas: (1) adicionar novas funcionalidades ao atual plano de controle baseado em GMPLS (*Generalized Multi-Protocol Label Switching*) ou (2) adotar um novo paradigma denominado *Redes Definidas por Software* (*Software Defined Network*, SDN). O GMPLS é um de plano de controle padrão IETF [13] constituído basicamente de um protocolo de roteamento com

engenharia de tráfego, em geral OSPF-TE (*Open Shortest Path First - Traffic Engineering*), um protocolo de sinalização, denominado RSVP-TE (*ReSerVation Protocol – Traffic Engineering*) e um protocolo para gerenciar os enlaces, denominado LMP (*Link Management Protocol*). Já o propósito da SDN é separar o hardware (plano de dados) e a inteligência da rede (plano de controle), ao mesmo tempo em que favorece uma gestão centralizada da rede. Na medida em que este sistema tem conhecimento de toda a rede, é possível um controle mais inteligente e eficiente de toda a rede. Nos equipamentos atuais, o plano de controle e o plano de dados são integrados através de uma interface proprietária, operando assim como uma “caixa preta”, como ilustra a Figura 7 (lado esquerdo). No entanto, quando o plano de controle e o plano de dados são separados por uma interface aberta, mantém-se o alto desempenho no encaminhamento de dados em hardware, aliado à flexibilidade de inserir, remover e especializar aplicações em software (lado (b) da Figura 7).

Figura 7 – Arquiteturas dos Equipamentos de Rede. Modelo atual (a) e modelo programável, aberto (b) [14].

De acordo com [6], a tendência atual é utilização da abordagem baseada em SDN, que será a adotada nesta tese.

O termo SDN foi usado inicialmente para se referir ao projeto OpenFlow desenvolvido na Universidade de Stanford [14]. No entanto, a sua utilização acabou sendo disseminada para outras tecnologias similares, nem sempre relacionadas a este projeto.

O protocolo OpenFlow (OF) define um protocolo de comunicação aberto entre o plano de controle e o plano de dados, sendo agnóstico a fornecedores. As regras e as ações a serem configuradas no hardware da rede são responsabilidade de um elemento externo denominado controlador que pode ser implementado em um servidor comum. Tal proposta permite a definição em software remoto, de aplicações de controle e de serviços de rede (por exemplo, descoberta de topologia, roteamento, controle de acesso, entre outros). Dessa forma, este novo paradigma traz consigo o conceito de redes definidas por software.

Em [15], uma extensão do OF foi definida para suportar um plano de controle unificado visando a integração das redes de comutação de pacotes com as redes de comutação de circuitos, incluindo as redes ópticas de acesso, metropolitanas e de núcleo. Esta extensão engloba um plano de comutação de dados e um plano de controle unificado, como ilustra a Figura 8. Além disso, abstrai o plano de comutação de dados através de uma tabela de fluxos. Cada entrada da tabela de fluxos consiste de uma regra, ações e contadores. A regra é formada com base na definição do valor de um ou mais campos do cabeçalho dos dados a serem transmitidos e a ela associa-se um conjunto de ações que definem como os dados devem ser processados e para onde devem ser encaminhados. Os contadores são utilizados para manter estatísticas de utilização e para remoção de fluxos inativos. As entradas da tabela de fluxos podem ser interpretadas como decisões em cache (hardware) do plano de controle (software) sendo, portanto, a unidade mínima de controle para definição do comportamento da rede. Quando os dados chegam a um equipamento com OpenFlow habilitado, os cabeçalhos são comparados com as regras das entradas das tabelas de fluxos, os contadores são atualizados e as ações correspondentes são realizadas. Caso o dado não corresponda a nenhuma entrada da tabela de fluxos, o mesmo é encaminhado para o controlador. Exemplos de fluxos OF são pacotes pertencentes a uma rede local virtual (*Virtual LAN*, VLAN) ou um comprimento de onda transportando 10 Gbit/s numa determinada grade espectral.

Figura 8– Plano de Controle OF Unificado. Adaptada de [15].

Esta extensão do OF não suporta diversos parâmetros relevantes dos *transponders* flexíveis e NG-ROADMs [16]. Assim, foi proposta uma especificação para fluxos ópticos mais ampla (Figura 9) que inclui parâmetros como: identificadores de porta, comprimento de onda ou frequência central da portadora óptica, a largura do espectro (através da especificação dos valores de n e m , definidos ITU-T G.694.1), tipo de sinal (taxa de bit, formato de modulação, restrições de comutação, limites para degradação da camada física, entre outros [16].

Por fim, foi proposta uma extensão do OpenFlow para redes ópticas através da inserção de um agente OpenFlow no topo do plano de controle GMPLS para prover a integração do OpenFlow com o GMPLS, permitindo assim o uso de todo legado GMPLS [17].

SA (*Source Address*) - endereço de origem
 DA (*Destination Address*) - endereço destino
 Src port (*Source port*) - porta de origem
 Dest port (*Destination port*) - porta de destino

Figura 9– Extensão do OF para Redes Ópticas de Próxima Geração. Adaptada de [16].

1.2. Redes Ópticas Cognitivas

O plano de controle das redes ópticas de próxima geração deve ser inteligente, capaz de determinar a rota, a largura do espectro, a taxa de transmissão, o formato de modulação, o código FEC de cada caminho óptico (*lightpath*) em tempo real. Devido ao grande número de graus de liberdade a serem considerados na (re) configuração das NG-ONs, o gerenciamento manual pode resultar numa otimização local ao invés de uma otimização global fim-a-fim.

Além disso, em redes ópticas denominadas transparentes, o tráfego é transportado em *lightpaths* sem qualquer conversão óptica-elétrica-óptica nos nós intermediários. Como isto, as degradações da camada física afetam os *lightpaths* tanto individualmente quanto seus pares co-propagantes ao longo do caminho de transmissão. Assim, o alcance de alguns *lightpaths* pode ser limitado, com base em algum limiar de qualidade do sinal como, por exemplo, a taxa de erro de bit (*Bit Error Rate*, BER) e a relação sinal ruído óptica (*Optical Signal to Noise Ratio*, OSNR). Dessa

forma, a maioria das rotas longas serão forçadas a usarem taxas de transmissão menores ou mudarem o formato de modulação para atenderem aos limiares definidos de qualidade de transmissão (QoT).

Nas redes ópticas de próxima geração, será necessário incluir uma unidade de decisão no plano de controle para determinar a rota, o formato de modulação e a porção do espectro para cada caminho óptico, antes do estabelecimento de conexão, visando maximizar a capacidade de transmissão, enquanto mantém a qualidade do sinal. Além disso, depois de estabelecida a conexão e com o auxílio de sistemas de monitoramento de rede, o formato de modulação e o espectro correspondente poderá ser alterado em tempo real, caso ocorra uma degradação da qualidade do sinal óptico. Assim, a seleção e a alteração das rotas devem ser feitas com base no conhecimento da situação atual da rede em termos de qualidade de transmissão e do tráfego e rearranjada dinamicamente, de forma autônoma, ou seja, sem a intervenção humana.

Neste contexto, os trabalhos relevantes na literatura incluem um estimador de qualidade de transmissão para redes ópticas de alta velocidade, denominado Q-Tool [19]. Esta ferramenta recebe a topologia da rede e um conjunto de caminhos ópticos e, em seguida, calcula os seus respectivos *Q-factors*. O *Q-factor* é um indicador de qualidade de transmissão onde um valor elevado corresponde a uma BER baixa e vice-versa. No entanto, esta ferramenta sofre de algumas limitações, tais como: 1) só é válida para taxa de 10 Gbit/s e formato de modulação OOK; e 2) devido aos cálculos analíticos complexos necessários, o tempo computacional para a tomada de decisões é muito grande para ser usado para controle em tempo real [19].

Alternativamente, foi proposto um estimador de QoT utilizando um algoritmo de inteligência computacional (IC) denominado CBR (*Case Based Reasoning*) [19]. Esta nova abordagem, usando técnicas de IC no plano de controle das redes ópticas, é denominada de redes ópticas cognitivas [20][21] e tem como objetivo oferecer vantagens para o plano de controle da rede com relação a uma rede não-cognitiva.

Foi demonstrado em [19] que o uso da técnica CBR no estimador de QoT tornou-o duas ordens de grandeza mais rápido que o Q-Tool e viável para operação em tempo real, demonstrando assim o ganho no uso de cognição. Além disso, a técnica CBR foi empregada para tomada de decisão em regiões de incerteza, onde o uso de limiares fixos de comprimento da rota para determinar a qualidade de transmissão não produzia bons resultados [19].

O objetivo das redes cognitivas (*Cognitive Optical Networks*, CONs) [20];[21] é a utilização de técnicas de IC, ao invés de modelos analíticos ou numéricos, para melhorar o desempenho do plano de controle para operação em tempo real. Uma rede cognitiva possui os seguintes mecanismos de controle: 1) observa e coleta informações do meio de operação; 2) avalia a relevância da informação coletada; 3) aprende com as experiências adquiridas no passado; 4) decide quais recursos de rede devem ser alocados e quais parâmetros destes recursos devem ser configurados ou reconfigurados ; e 5) ajusta os parâmetros da rede dinamicamente. Além disso, os passos 2 e 4 devem seguir metas fim-a-fim dadas pelos operadores de rede. Este sistema deve ser complementado com um sistema de monitoramento, que provê as informações sobre o meio de operação em tempo real.

A motivação para o desenvolvimento de propriedades cognitivas é a possibilidade de obtenção de um melhor desempenho global com relação às redes que não empregam cognição. Assim, o sistema cognitivo visa melhorar o gerenciamento dos recursos, a Qualidade de Serviço (QoS), a economia de energia, a robustez e a segurança da rede. Além disso, a cognição pode ser utilizada para “imitar” as decisões feitas por operadores humanos e minimizar a intervenção dos operadores, o que deve reduzir de forma significativa o custo operacional da rede devido à automatização das ações.

Outro benefício das redes cognitivas é a possibilidade de redução do tempo de estabelecimento/liberação das conexões e a diminuição da probabilidade de bloqueio. A minimização do tempo de estabelecimento/liberação de conexões pode ocorrer devido às informações sobre a disponibilidade de recursos, tráfego e qualidade da transmissão já estarem disponíveis para análise no momento em que a demanda acontece. No plano de controle tradicional, um tempo adicional é gasto para verificar estas condições, após a banda ter sido reservada pelo procedimento de sinalização, ainda com possibilidade de rejeição da conexão, caso as condições não estejam adequadas. Com relação à diminuição da probabilidade de bloqueio de conexões, isto pode ocorrer devido à possibilidade de se diminuir a taxa de transmissão ou mudar o formato de modulação, caso a qualidade do caminho óptico encontrado não esteja adequada ou não hajam recursos disponíveis. Esta troca de informações entre o plano de controle da rede e o sistema de monitoramento da camada física tem sido denominada *cross layer design*.

Existem diversos projetos em curso atualmente na área de redes ópticas cognitivas [22][23][24]. De um modo geral, nestes projetos, a arquitetura do sistema é composta de três camadas: (1) elementos de rede configuráveis por software, (2) processos cognitivos e (3) camada de metas fim-

a-fim, conforme ilustra a Figura 10. Além disso, existem também sensores para se efetuar o monitoramento do estado da rede em tempo real.

Figura 10– Modelo de Rede Cognitiva.

A camada de elementos de rede configuráveis por software é composta dos equipamentos do tipo *transponders* flexíveis, NG-ROADMs, amplificadores ópticos, etc.; a camada de processo cognitivo corresponde a uma extensão do plano de controle, empregando técnicas de inteligência computacional. A camada de objetivos fim-a-fim fica acima do plano de controle (meta-plano de controle) e está relacionada aos objetivos (metas) de alto nível, determinados pelos operadores da rede.

1.3. Técnicas de Inteligência Computacional

Uma característica essencial das redes cognitivas é o aprendizado. Então, escolher uma técnica de inteligência computacional com aprendizado para tomada de decisão em redes ópticas de próxima geração é essencial para trazer vantagens no uso da cognição. Esta técnica deve minimizar a complexidade computacional, uma vez que a configuração e a reconfiguração dos parâmetros da rede deve ocorrer em tempo real, além de ter que ser precisa na tomada de decisão. Atualmente, existem diversas técnicas de inteligência computacional, cada uma com vantagens e desvantagens, dentre as quais se destacam algumas mais comumente empregadas, apresentadas a seguir.

1.3.1. Raciocínio Baseado em Casos

O Raciocínio Baseado em Casos (*Case-Based Reasoning*, CBR) é uma das técnicas de IC mais utilizadas em redes cognitivas e resolve problemas a partir da recuperação de casos similares ocorridos no passado [25]. Quando um novo caso surge, o algoritmo CBR busca em sua memória (uma base de dados) o caso mais similar ao problema novo. Então, a solução encontrada no passado é recuperada e reusada no caso presente, considerando-se ou exatamente a mesma solução ou uma adaptação para o novo caso. Em seguida, este novo caso é armazenado na base de dados e disponibilizado para a resolução de problemas futuros. No CBR, quanto mais casos são armazenados na base de dados, melhor é a qualidade do sistema. Entretanto, se a base de dados for muito grande, pode ocorrer uma lentidão na busca de casos similares. Além disso, de acordo com [19], a base de dados precisa ser revisada periodicamente com técnicas de aprendizado e “esquecimento” para que o desempenho do algoritmo seja mantido. A abordagem CBR também não provê um bom desempenho para problemas envolvendo diversos parâmetros correlacionados entre si. Neste caso, pesos diferentes podem ser atribuídos a cada parâmetro na base de dados, o que pode não ser suficiente para considerar todas as correlações entre os mesmos, sendo necessário o uso de técnicas adicionais para resolver este problema.

O CBR tem sido utilizado recentemente em rádios cognitivos, em redes ópticas cognitivas, para estimar a qualidade da transmissão e em redes sem fio, para melhorar a cobertura e para alocação eficiente de espectro [26].

1.3.2. Redes Neurais Artificiais

Uma rede neural artificial (RNA) é inspirada nas redes neurais biológicas e é composta de neurônios artificiais e interconexões. Os neurônios recebem os sinais ou medidas do meio externo e as interligações entre eles têm um peso associado [27] [28]. Os pesos podem ser positivos (excitatórios) ou negativos (inibidores). Além disso, há uma função de ativação que decide para quais entradas os neurônios devem ser ativados. Esta função pode ser do tipo limiar ou uma função mais complexa, do tipo sigmoide, por exemplo. Assim, através da utilização de modelos matemáticos, os neurônios oferecem uma resposta que se propaga através da rede neural. Existem duas categorias principais em relação à estrutura de uma rede neural: redes do tipo *feedforward* e redes de realimentação (*feedback*). No primeiro caso, os sinais se propagam somente das entradas para as saídas da RNA. Isto significa que a saída de uma camada de rede tem uma influência apenas nas camadas seguintes. Por outro lado,

as RNAs de feedback são mais complexas uma vez que os sinais podem propagar em ambas as direções e há *loops* de feedback entre as diferentes camadas [27].

As RNAs são treinadas para resolver problemas concretos, ou seja, a rede adquire a habilidade de realizar determinadas tarefas, ajustando seus parâmetros internos. Para isto, é necessária uma etapa de treinamento. Existem três métodos de treinamento: supervisionado, não supervisionado e reforço. O treinamento supervisionado consiste em se utilizar um conjunto de entradas e respectivas saídas representativas do processo. No aprendizado não supervisionado, a rede só se baseia nas entradas e não existem as saídas. O treinamento de reforço é considerado uma forma intermediária entre o supervisionado e não supervisionado [27]. Neste tipo de treinamento, o sistema recebe um retorno do ambiente de operação e, se necessário, ajusta seus parâmetros. Com relação à base de dados, é importante ressaltar que uma vez que a RNA esteja treinada, a base de dados é incorporada nos pesos das interligações dos neurônios.

As redes neurais artificiais são amplamente usadas para classificação de padrões, aproximação de funções, otimização de sistemas, agrupamento (clusterização) entre outras. Além disso, de acordo com [26], as RNAs têm sido empregadas na área de telecomunicações em rádios cognitivos para predição espectro e seleção de canal e também em redes ópticas para ajustar o ponto de operação de uma cascata de amplificadores, entre outras [29].

1.3.3. Algoritmos Genéticos

Algoritmos genéticos (AGs) são algoritmos de busca baseados na seleção natural e genética, onde, de acordo com a teoria de Darwin, os indivíduos mais adaptáveis são os que conseguem sobreviver num ambiente competitivo [30]. Eles simulam a evolução de espécies e possuem uma estrutura que parte de uma população inicial, dada de forma aleatória, e após isso, os indivíduos são selecionados, passados pelos métodos de cruzamento e mutação [30]. Os parâmetros do sistema são considerados como genes e podem ser estruturados com uma cadeia ou cromossomos. Uma função de avaliação (*fitness*) é definida, a fim de avaliar cada indivíduo. Em cada passo, os indivíduos mais aptos são selecionados para serem os pais e em seguida, eles são evoluídos por meio de operadores genéticos, tais como reprodução, cruzamento, e mutação, para gerarem filhos (a geração seguinte) que, em princípio, podem ser mais adaptados que seus pais. Finalmente, um esquema de substituição é aplicado para determinar quais os indivíduos da população vão sobreviver a partir dos filhos e pais. Este processo é repetido até que um critério de parada seja cumprido [30].

O operador reprodução cria uma cópia literal de indivíduos selecionados a partir da população-mãe na geração descendente. O operador de cruzamento é aplicado a pares de indivíduos, de modo a permutar o seu material genético. Para gerar uma boa prole, um bom mecanismo para a seleção de pais é necessário. A seleção aleatória é uma das técnicas mais comuns. Ao utilizar este método, a probabilidade de selecionar um indivíduo é proporcional à sua aptidão. Desta forma, boas propriedades devem propagar ao longo das gerações. Por outro lado, o operador de mutação faz uma alteração aleatória no material genético de um único indivíduo, o que permite ao AG explorar novos espaços e não ficar preso em uma condição local. O processo de evolução é repetido um número pré-definido de iterações ou até que outro critério seja atendido. Finalmente, deve-se observar que AGs são métodos genéricos que têm de ser personalizado para os problemas específicos que tentam resolver. Por conseguinte, o desenho do mecanismo de codificação dos indivíduos e os diferentes parâmetros dos AGs devem ser adaptados às características do problema em questão, uma vez que têm um impacto significativo no desempenho do algoritmo. A desvantagem principal deste método é o tempo de processamento maior para operação em tempo real [31].

Os AGs têm sido usados em diversas áreas de telecomunicações, tais como para resolver problemas de otimização de rede, clusterização, segurança e robustez em comunicações sem fio, roteamento com restrições de QoS, projeto de topologias virtuais em redes ópticas estáticas, redes reconfiguráveis, redes ópticas dinâmicas e recuperação de falhas em redes ópticas [26].

1.3.4. Fuzzy C-Means

O algoritmo *Fuzzy C-Means* (FCM) foi proposto por Bezdek [32] e tem sido amplamente utilizado para clusterização, classificação e reconhecimento de padrões. Este é um algoritmo híbrido, resultante da combinação de lógica nebulosa (*fuzzy*) com a teoria de agrupamento de dados. Os sistemas fuzzy são uma extensão da lógica booleana e admitem valores intermediários entre o falso ("0") e o verdadeiro ("1"). Já os métodos de agrupamento são empregados para agrupar um conjunto de dados em diferentes grupos (*clusters*) em função de sua similaridade em relação a algum atributo. Quando a pertinência a algum grupo é exclusiva, os métodos de agrupamento são denominados *hard* ou *crisp*. Exemplos de tais métodos são o algoritmo *K-Means*, as redes auto-organizáveis de *Kohonen*, (*Self-Organization Maps*, SOM), os AGs, entre outros [28]. Já no algoritmo FCM, há uma sobreposição de pertinência aos grupos, sendo que o grau desta pertinência a um determinado grupo é dado por uma função de pertinência. Dessa forma, a técnica FCM provê uma solução rica e flexível, mais adequada para o cenário complexo das redes ópticas de próxima geração. As principais vantagens da utilização deste algoritmo são a criação automática de regras, a partir de um conjunto de

dados de treinamento, provendo aprendizado, o tempo de execução extremamente rápido, o que possibilita a tomada de decisão em tempo real e a possibilidade de adaptação das funções de pertinência em tempo real, quando operando em conjunto com sistemas de monitoramento da rede. Com relação à base de dados, é importante ressaltar que uma vez que o FCM esteja treinado, esta base fica incorporada às regras geradas pelo algoritmo, sendo desnecessária a manutenção de uma base de dados e o uso de técnicas de aprendizado e esquecimento como no CBR, o que proporciona rapidez e precisão ao plano de controle. Recentemente, o FCM foi utilizado em rádio cognitivo para estimativa do canal rádio, alocação de espectro e determinação do formato de modulação, em tempo real, demonstrando ganhos efetivos em relação ao uso da técnica CBR [31]. Com base em todas estas características, o FCM foi a técnica escolhida para ser investigada nesta tese para aplicação em redes ópticas de próxima geração.

1.4. Contribuições da Pesquisa

As principais contribuições desta tese são as seguintes:

- ✓ Algoritmo de agrupamento FCM para aprendizado e tomada de decisão em tempo real em redes ópticas de próxima geração. FCM possibilita a geração automática de regras com base na experiência adquirida no meio de operação.
- ✓ Estudo de caso com a utilização do algoritmo FCM para determinar, em tempo real, o formato de modulação dos *transponders* flexíveis de acordo com a qualidade da transmissão dos canais ópticos.
- ✓ Comparação de desempenho entre os algoritmos FCM e CBR.
- ✓ Definição de uma arquitetura para o plano de controle de redes ópticas de próxima geração incluindo o algoritmo FCM no contexto de redes definidas por software.
- ✓ Elaboração de um conceito de rede óptica cognitiva.

1.5. Organização do Trabalho

Esta tese contém 6 capítulos. O levantamento do estado da arte de redes cognitivas, através de um histórico da evolução do conceito e de diversos exemplos de arquiteturas de redes cognitivas é apresentado no **Capítulo 2**. A formulação teórica dos algoritmos FCM e CBR é apresentada no **Capítulo 3**. No **Capítulo 4** é proposto um conceito de rede óptica cognitiva e é descrito um estudo de

caso onde o algoritmo FCM é utilizado para determinar o formato de modulação dos *transponders* flexíveis de acordo com a qualidade da transmissão dos canais ópticos. No Capítulo 5 são apresentados os resultados de desempenho do algoritmo proposto, uma comparação deste desempenho com o algoritmo CBR e uma arquitetura sistêmica para o plano de controle usando o algoritmo FCM no contexto das redes ópticas definidas por software. As conclusões extraídas dos resultados dos capítulos anteriores são discutidas no **Capítulo 6**. Além disso, são listados os trabalhos publicados a partir dos estudos apresentados e apresentadas algumas propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Conceitos e Arquiteturas de Redes Cognitivas

As redes ópticas atuais estão se tornando cada vez mais complexas devido à sua ampla abrangência, ao emprego de múltiplas taxas de transmissão e formatos de modulação, diferentes tipos de equipamentos e ao grande número de interações entre os sistemas de controle e gerenciamento e os equipamentos da rede. No entanto, estas redes atualmente são gerenciadas por sistemas que dependem fortemente do conhecimento humano e da habilidade dos seus administradores para planejá-las, configurá-las e fazer sua manutenção. Tipicamente as adaptações e as alterações na rede são efetuadas de forma reativa, ou seja, após a ocorrência de problemas. Isto acontece devido à rede não possuir funcionalidades que permitam a ciência do seu estado, nem das metas que deve atingir. Com o objetivo de remover estas limitações e permitir que as redes se tornem mais dinâmicas, autônomas e pró-ativas, é que surgiu o conceito de redes ópticas cognitivas. A ideia principal deste conceito é incorporar inteligência (cognição) aos sistemas de gerenciamento e controle da rede visando torná-la adaptável dinamicamente, autônoma e com capacidade de aprendizado a partir de eventos ocorridos no passado. Em geral, as arquiteturas de redes cognitivas visam reproduzir em certo grau o processamento cognitivo do sistema nervoso humano e implementar funcionalidades deste sistema a nível computacional. Já o termo autônomo tem origem na capacidade de auto-regulação do sistema nervoso humano e idealiza uma rede de telecomunicações na qual os administradores se preocupam basicamente com as decisões de alto nível, que correspondem às regras de negócio, enquanto a rede, juntamente com o sistema de gerenciamento e controle, têm a função de atender essas regras, tomando decisões próprias como, por exemplo, autoconfigurando os equipamentos, auto-otimizando seus parâmetros, auto-recuperando-se de falhas e auto-protegendo-se contra ataques ou erros.

Assim, as redes ópticas de próxima geração precisam estar cientes do meio de transmissão, dos requisitos dos serviços, das políticas dos operadores, etc. para prover os serviços e aplicações com agilidade, confiabilidade e otimização de recursos. Tais redes devem efetuar ações baseadas em raciocínio e com funcionalidades adaptativas e autonômicas. Estas ações são tomadas com relação aos objetivos fim-a-fim, ou seja, devem envolver os diversos elementos de rede conectados. Nestas redes, um sistema cognitivo observa, planeja, decide, atua e aprende com base nas informações coletadas da rede.

A seguir, é apresentado um histórico de evolução do conceito de rede cognitiva culminando no conceito rede óptica cognitiva. São também apresentados diversos exemplos de arquiteturas de redes cognitivas, incluindo as funcionalidades e casos de uso de arquiteturas de redes ópticas cognitivas.

2.1. Conceito de Rádio Cognitivo

O termo “cognitivo” aplicado à área de redes de comunicações foi utilizado pela primeira vez por Mitola em 2000, o inventor da tecnologia de rádio cognitivo (*Cognitive Radio*, CR) [33]. Mitola definiu rádio cognitivo como um sistema no qual o rádio, “*autonomamente, observa o ambiente, infere seu contexto, avalia possibilidades, cria planos, supervisiona os serviços e aprende com seus erros*”. Este sistema, ilustrado na Figura 11, emprega um modelo de aprendizado (cognição) baseado em técnicas de Inteligência Computacional (*Model-Based Reasoning*) e na representação computacional das funcionalidades do rádio cognitivo numa linguagem de representação do conhecimento (*Radio Knowledge Representation Language - RKRL*).

Figura 11– Sistema de Rádio Cognitivo de Mitola [33].

O sistema cognitivo aqui é empregado para operar sobre uma plataforma de rádio definido por software (*Software Defined Radio, SDR*), que é um rádio que pode operar sob uma ampla faixa de RF (*Radio Frequency*), com diferentes modos de interface aérea, configurados por software. Os SDRs constituem a plataforma de suporte onde as técnicas de aprendizado são empregadas para treinamento e configuração.

O CR definido por Mitola suporta um laço (*loop*) de controle composto por seis etapas (Figura 12): (1) *Observação*, onde o rádio interage com o ambiente, (2) *Aprendizado*, onde aprende, (3) *Orientação*, onde estabelece prioridades, (4) *Planejamento*, onde gera possibilidades, (5) *Decisão*, onde aloca recursos, define configurações e (Ação), onde ajusta suas funcionalidades.

Figura 12– Ciclo Cognitivo [33].

Além disso, na visão de Mitola, a tecnologia de rádio cognitivo é um exemplo de aplicação da tecnologia computacional de agentes inteligentes na área de telecomunicações onde, agentes são componentes de software com atributos de autonomia, interatividade, reatividade, orientação a metas, mobilidade, adaptabilidade e capacidade de planejamento, reflexão e cooperação. A seguir, Haykin definiu rádio cognitivo em [34] como “*um sistema de comunicação inteligente, ciente do ambiente que o circunda, e que utiliza uma metodologia de aprendizado para aprender com o ambiente e adaptar seus estados internos em função das mudanças aleatórias nos valores de RF, através do ajuste em tempo real dos parâmetros de operação (por exemplo, potência de transmissão, frequência da portadora, formato de modulação, etc.) visando atingir dois objetivos principais:*

- *Uma comunicação altamente confiável, disponível em todo lugar e a todo o momento;*
- *A utilização eficiente do espectro de rádio frequência”.*

Esta definição engloba conceitos chave para as redes cognitivas, tais como: ciência do contexto (*awareness*), inteligência para aprender e se adaptabilidade, confiabilidade e eficiência. Haykin também menciona a plataforma de rádio definido por software como suporte para os CRs e define as principais tarefas do rádio cognitivo: (1) analisar o ambiente rádio, através da estimativa das interferências no meio e da detecção de oportunidades de ocupação do espectro; (2) identificar o canal a ser utilizado pelo transmissor, (3) controlar a potência do transmissor e (4) gerenciar o espectro.

A definição de CR de Mitola e Haykin foi alterada pela *Federal Communication Commission* (FCC) [35] que definiu CR como sendo um “*rádio com capacidade de alterar os parâmetros de transmissão com base na interação com o ambiente de operação, sendo que esta interação pode envolver negociações ativas com outros rádios usuários do espectro, sensoramento passivo do espectro e tomada de decisão pelo próprio rádio*”. Nesta definição, não fica explícita a utilização de uma plataforma configurável por software e o CR assemelha-se a um rádio com capacidade somente de reconfiguração de seus parâmetros e alocação dinâmica de banda no espectro (rádio adaptativo). Assim, esta definição apresenta um escopo mais limitado em termos de cognição que as definições de Mitola e Haykin.

Por outro lado, as definições de CR de Mitola, Haykin e FCC possuem em comum um escopo local de operação, ou seja, por elemento de rede, e que considera somente a camada física e a camada MAC do modelo OSI como base. Isto limita a atuação do processo cognitivo, uma vez que o mesmo fica desprovido de uma visão dos requisitos dos usuários, que poderia ser obtida através da interação com a camada de aplicação.

2.2. Conceito de Rede Cognitiva

A primeira definição de uma rede cognitiva (*Cognitive Network* – CN) (ao invés de somente nós isolados) foi apresentada por Thomas *et al.* em [36]. Os autores se inspiraram no plano de conhecimento (*Knowledge Plane*, KP) definido por Clark *et al.* [37]. O objetivo principal do KP é agregar a capacidade de auto-recuperação à rede. Motivados pelo fato de que uma abordagem incremental, construída a partir da adição de novos algoritmos ou protocolos à rede, ou da melhoria dos existentes, não seria suficiente para atingir tal capacidade, os autores sugeriram agregar um plano de conhecimento à rede. O KP consiste basicamente num sistema cognitivo distribuído com capacidade de aprendizado e raciocínio e projetado como um laço de controle fechado. Este sistema espalha-se verticalmente na pilha de protocolos de cada elemento de rede e horizontalmente entre os elementos de rede. Assim, o KP possui a capacidade de observação a partir de diferentes pontos da

rede e emprega uma abordagem unificada para resolver os problemas, evitando soluções particulares que poderiam levar a uma sub-otimização da rede. Além disso, é capaz de operar num ambiente dinâmico e seguindo metas de alto nível. Os pesquisadores também vislumbraram características avançadas tais como: capacidade de raciocinar sobre o conteúdo das informações de forma a priorizar uma informação local em detrimento de uma informação global da rede, quando necessário. Assim, com base no KP, a rede cognitiva foi definida como: *“rede que engloba um processo cognitivo capaz de perceber a situação atual, planejar, decidir e atuar sob estas condições. Esta rede pode aprender a partir de adaptações realizadas no passado e usar este conhecimento para tomar decisões futuras, levando em consideração as metas fim-a-fim”*. Esta definição é mais abrangente que as anteriores, pois possui um escopo global da rede e uma visão dos requisitos dos usuários (metas fim-a-fim). A Figura 13 mostra a arquitetura da rede cognitiva proposta por [38].

Figura 13– Estrutura da Rede Cognitiva [38].

Na Figura 13, na camada de Aplicação são definidas as metas fim-a-fim que direcionam o comportamento do processo cognitivo, identificando e priorizando os requisitos dos usuários e aplicações. Na camada processo cognitivo existem três componentes: a linguagem de especificação, a camada de cognição e as entradas/saídas de/para a rede (APIs). Estes componentes seguem o laço de

controle definido por Mitola (Figura 12) e contém as interfaces com os elementos de rede configuráveis. A linguagem de especificação cognitiva tem o objetivo de mapear os requisitos de alto nível (camada de aplicação) para as camadas inferiores da arquitetura e a arquitetura tem a capacidade de se adaptar a novos tipos de elementos de rede, novas aplicações e metas [38].

Esta arquitetura inclui também o suporte à operação centralizada ou distribuída e o compartilhamento da informação da camada de cognição entre os múltiplos elementos de rede na arquitetura distribuída. Os sensores provêm informação sobre o estado dos elementos de rede para a camada cognitiva. A API é uma camada intermediária entre a rede reconfigurável por software e a camada de cognição, através da qual os estados operacionais dos elementos de rede são enviados para a camada de cognição e os comandos de controle da camada de cognição são enviados aos elementos de rede. A definição de rede cognitiva [38] adiciona metas fim-a-fim à arquitetura e a possibilidade de cooperação entre as diversas camadas (*cross-layer design*) de cada elemento de rede e entre os diversos elementos de rede, o que a diferencia das definições anteriores.

A definição de rede cognitiva foi ampliada da seguinte forma: “*uma rede cognitiva é uma rede de comunicação com um plano de conhecimento, similar ao definido por Clark, que faz uso da troca de informação entre as camadas de um elemento de rede e entre diferentes elementos de rede e tecnologias*”[39], conforme mostra a Figura 14. Este plano de conhecimento inclui um modelo de informação, para a representação dos conhecimentos relevantes dos elementos de rede e um laço de controle cognitivo, que emprega técnicas de inteligência computacional e consiste de seis estados: sensoramento, planejamento, decisão, atuação, aprendizado e políticas, conforme mostra a Figura 15.

Neste laço de controle, sensores são empregados para monitoramento do ambiente e as informações coletadas são usadas para o planejamento e para alimentar o módulo de aprendizado, que por sua vez interage com o módulo de decisão. O módulo de planejamento determina ações potenciais com base nas políticas armazenadas no módulo de políticas. Os atuadores são responsáveis pela execução das mudanças adequadas (reconfigurações) nos elementos de rede. Este laço de controle se diferencia do apresentado por Mitola (Figura 12) devido à adição de políticas dadas pelos operadores da rede.

Figura 14 – Plano de Conhecimento [39].

Figura 15– Modelo de Rede Cognitiva [39].

As arquiteturas de redes cognitivas atuais são utilizadas basicamente em dois tipos de redes: redes de acesso sem fio e redes de núcleo (*core*), mas para diferentes finalidades [39]. No caso de redes de acesso sem fio, a rede cognitiva visa auxiliar o gerenciamento de múltiplas tecnologias numa mesma rede (redes heterogêneas) e o grande número de dispositivos que podem ser reconfigurados dinamicamente, em função das preferências dos usuários e das condições de transmissão do meio rádio. Já em redes de núcleo, a cognição visa tornar o sistema menos dependente dos operadores humanos, ou seja, autogerenciados. Em tais redes, a gerência torna-se bastante complexa devido à

enorme quantidade de alarmes que devem ser analisados simultaneamente, bem como das reconfigurações manuais para reparação da rede e configuração de novos serviços.

Foram analisadas sete arquiteturas de redes cognitivas, sendo seis de redes de acesso sem fio e uma de rede de núcleo [39]. O resultado desta análise indicou que em todas as arquiteturas: (1) empregam-se metas fim-a-fim para direcionar os processos cognitivos, (2) utiliza-se algum tipo de laço de controle e (3) usa-se um conceito similar ao plano de conhecimento de Clark [37]. No entanto, as arquiteturas cognitivas de redes de acesso sem fio lidam basicamente com a reconfiguração das interfaces rádio e com o gerenciamento dos recursos do rádio, ao passo que as arquiteturas cognitivas de redes de core se ocupam do gerenciamento dos recursos da rede visando a automatização dos processos executados manualmente pelos operadores de rede e a otimização dos recursos.

Outra conclusão apresentada pelos autores é que a terminologia empregada não é uniforme nas arquiteturas. Algumas são denominadas autônomas (ao invés de cognitivas), referindo-se a uma rede que pode operar com pouca intervenção humana, isto é, auto-gerenciável. Outras são denominadas cognitivas, referindo-se à capacidade de raciocínio, aprendizado e auto-conhecimento da rede. Esta confusão deve-se ao fato de não ser clara a diferença entre estes dois termos. O termo autônomo é inspirado no sistema nervoso autônomo humano que realiza tarefas essenciais como o controle da respiração, circulação do sangue, controle de temperatura, adaptação automática do corpo frente às modificações do ambiente, etc. sem que haja consciência desta tarefa. A existência deste sistema possibilita o funcionamento autônomo das funções vitais e de certa forma “libera” o cérebro para a realização de tarefas que exijam pensamento e aprendizado (cognitivas). Assim, os autores concluem que o termo autônomo tem um escopo mais restrito que o termo cognitivo, sendo aplicado a tarefas repetitivas e previsíveis, que são realizadas através da utilização de algoritmos. Ao passo que uma abordagem cognitiva é requerida em situações novas, que exigem aprendizado. Apesar desta distinção, o que ocorre na prática é que algumas arquiteturas de redes denominadas autonômicas podem conter alguma capacidade de aprendizado e raciocínio para se auto-gerenciar e as arquiteturas denominadas cognitivas possuem em geral a capacidade de operar com a mínima intervenção humana, ou seja, possuem funcionalidades autonômicas (auto-*), dentre as quais se destacam:

- **Auto-configuração:** o sistema detecta e configura automaticamente novos sistemas e componentes, promovendo os ajustes necessários para a incorporação dos novos elementos de rede.

- **Auto-cura:** o sistema detecta, diagnostica e repara problemas para que a rede continue operando normalmente.
- **Auto-otimização:** o sistema monitora a rede continuamente e efetua rearranjos para otimização na utilização de recursos e desempenho.
- **Auto-proteção:** o sistema identifica rapidamente ameaças e vulnerabilidades executando ações de proteção adequadas.

2.3. Arquiteturas de Redes Cognitivas

O projeto de uma arquitetura de rede óptica cognitiva inclui a identificação de suas capacidades mínimas, funcionalidades essenciais e uma justificativa de tais escolhas. Visando a identificação de tais capacidades, foi efetuado um levantamento de diversas arquiteturas de redes cognitivas propostas ou implementadas recentemente, desde as mais conceituais até as mais aplicadas. Assim, são apresentadas, de forma resumida, as seguintes arquiteturas pesquisadas: BICA (*Biologically Inspired Cognitive Architecture*) [40], [41], CogProt (*Cognitive Configuration and Optimization of Communication Protocols*) [42], PBM (*Policy-Based Management of Radio Resources and Autonomic Computing*) [43], E³ (*End-to-End Efficiency*) [44], Cognition (*Cognitive Optical Network Architecture*) [45], [23] e a CHRON (*Cognitive Heterogeneous Reconfigurable Optical Network*) [26].

2.3.1. BICA (*Biologically Inspired Cognitive Architecture*)

BICA foi um projeto do IPTO (*Information Processing Technology Office*) da DARPA (*Defense Advanced Projects Agency, USA*) que ocorreu no período de 2005 a 2006, com o objetivo de criar um conjunto de modelos de Inteligência Computacional para arquiteturas de redes do futuro. Estes modelos visaram reproduzir, em certo grau, o processamento cognitivo dos seres humanos em dois níveis: (1) reações de curto prazo e (2) reações de longo prazo e implementar estes comportamentos a nível computacional. BICA propôs uma arquitetura que introduz três processos ao comportamento cognitivo: (1) reativo, (2) deliberativo ou pró-ativo e (3) reflexivo. O processo reativo compreende uma rede cognitiva que reage automaticamente aos eventos e percepções do ambiente, não levando em consideração possibilidades futuras, nem a formulação de hipóteses sobre o comportamento do sistema. Já o processo pró-ativo tem a habilidade de representação e raciocínio sobre a situação, comparando e avaliando consequências futuras. Por fim, o processo reflexivo habilita os elementos cognitivos a monitorar e controlar seu próprio desempenho e adaptar-se a situações

futuras com base no histórico de ocorrências passadas. A Figura 16 ilustra a interação entre estes processos.

Esta arquitetura também explorou dois processos adicionais: (1) baseado em reflexos, no qual o comportamento é pré-programado e (2) meta-cognitivo (autoconsciente), construindo assim uma hierarquia em níveis destes processos, como mostra a Tabela 3.

Figura 16– Arquitetura Cognitiva BICA [40].

Tabela 3– Hierarquia de Arquiteturas Cognitivas [41].

Tipo de Arquitetura Cognitiva	Capacidade do Agente	Nível
Baseado em Reflexos	Comportamento e respostas pré-programadas	Inferior
Reativo ou adaptativo	Forma sub-cognitiva de aprendizado e adaptação	Baixo
Deliberativo ou Pró-Ativo	Raciocínio, planejamento, exploração e decisão	Médio
Reflexivo	Modelamento interno do ambiente e do comportamento das entidades pertencentes a este ambiente	Alto
Meta-Cognitivo	Modelamento de agentes que incluem o seu próprio estado, baseado em auto-conceito	Superior

Adicionalmente, um projeto complementar da DARPA, denominado Incog (*Integrated Cognition*) [24] apresentou uma estrutura em seis dimensões (eixos), mostrada na Figura 17, onde cada eixo representa um agrupamento de componentes chave para a composição da capacidade de cognição humana.

Figura 17– Componentes Chave da Cognição Humana [24].

Na Figura 17:

- Unificação é o processo de combinar diferentes elementos cognitivos num sistema para gerar o comportamento de um agente cognitivo;
- Estratégias de aprendizado correspondem aos modos de inferência e aprendizado empregados no sistema;
- Domínios de raciocínio representam os diferentes tipos de raciocínio empregados: temporal, espacial, etc.;
- Mecanismos de raciocínio são sistemas para geração de conclusões a partir de premissas;
- Abstração do conhecimento provê uma classificação do conhecimento em níveis de complexidade crescente, desde a descrição de fatos até histórias e lições complexas e

- Conhecimento representa uma coleção de memórias persistentes empregadas para dar suporte aos processos de raciocínio, aprendizado e unificação do sistema cognitivo.

E à medida que se distanciam do centro dos eixos, estes componentes possuem um grau de dificuldade maior para serem obtidos.

Este modelo pode ser útil na definição de diferentes graus de cognição e componentes chave para as arquiteturas de redes cognitivas.

2.3.2. CogProt (*Cognitive Configuration and Optimization of Communication Protocols*)

CogProt é uma arquitetura de redes cognitivas proposta por *Kliazovich et. al.* [42] em 2010 que possibilita a reconfiguração dinâmica dos parâmetros dos protocolos empregados na rede visando a otimização do seu desempenho. A Figura 18 mostra os componentes desta arquitetura.

Figura 18– Componentes da Arquitetura CogProt [42].

O **Plano Cognitivo** é responsável pela análise dos dados e processos de tomada de decisão, visando atingir o ponto operacional ótimo em termos de métricas de qualidade estabelecidas.

A **Coordenação entre Camadas (Cross-Layer)** e o **Plano de Sinalização** atuam como uma camada intermediária entre a pilha de protocolos e o plano cognitivo, efetuando as devidas intermediações entre as partes;

O **Motor de Cognição da Rede (Network Cognitive Engine)** é responsável pela coordenação dos planos cognitivos dos diversos nós da rede. Neste elemento, são gerados as metas e o conhecimento global da rede, utilizados para ajustar os nós.

O processo de adaptação é efetuado de acordo com um laço de controle que consiste de três fases: análise de dados, tomada de decisão e ação, ilustradas na Figura 19.

Figura 19– Laço de Controle da CogProt [42].

O plano cognitivo monitora a operação da rede e o desempenho dos protocolos através de métricas de qualidade tais como a taxa de entrega de pacotes, atraso fim-a-fim, taxa de bit, etc. O laço de controle é completado com as ações de reconfiguração do plano cognitivo.

Na abordagem proposta, cada parâmetro do protocolo (P) é expresso em termos de valores *default* P_{def} e seu intervalo de operação $[P_{min}, P_{max}]$. Ao final de um intervalo I , o mecanismo cognitivo mede e armazena o desempenho obtido do valor atual de P de acordo com a métrica de qualidade estabelecida. Então, o mecanismo seleciona um valor de P entre $[P_{min}, P_{max}]$ visando obter o melhor desempenho.

De acordo com [42], uma prova de conceito desta arquitetura foi simulada usando o *Network Simulator* (ns-2) utilizando a pilha de protocolos TCP/IP. Esta arquitetura apresenta uma característica interessante de auto-otimização e auto-configuração de redes de comunicação, permitindo a reconfiguração dinâmica dos parâmetros dos protocolos das diferentes camadas da rede para atender métricas de qualidade.

A CogProt pode interoperar com a rede legada pois não altera as mensagens e o modo de operação dos protocolos padronizados. Esta abordagem pode ser empregada em paralelo às abordagens baseadas em políticas visando superar algumas deficiências desta última. Por exemplo, a definição das políticas ficando somente a cargo dos operadores da rede, pode levar à sub-utilização os recursos de rede ou mesmo a falhas, caso certas políticas tenham sido omitidas. Além disso, podem ocorrer conflitos não previstos nas políticas. Assim, a abordagem baseada em aprendizado pode ser útil para superar estas limitações.

2.3.3. Arquitetura de Rádios Cognitivos

A seguir são apresentadas duas propostas de arquiteturas de rádios cognitivos: PBM de 2006 e E³ de 2010.

2.3.3.1. PBM (*Policy-Based Management of Radio Resources and Autonomic Computing*)

O princípio desta arquitetura é empregar cognição para gerenciar a complexidade da infraestrutura das redes de acesso sem fio, composta por diversas tecnologias de redes celulares (de segunda geração (2G, 2,5G), de terceira geração (3G), WiMax e outras). A complexidade desta rede ocorre devido à heterogeneidade dos dispositivos e elementos de rede e à dinamicidade da configuração de serviços ubíquos com diferentes requisitos definidos pelos usuários. Portanto, os operadores da rede têm que lidar com diferentes tecnologias e configurá-las de forma a atender diferentes níveis de QoS. Neste caso, a QoS refere-se aos níveis de desempenho (taxa de bit, atraso fim-a-fim, etc.), disponibilidade (taxa de bloqueio de conexões), confiabilidade (baixa probabilidade

de bloqueio de *handover*), bem como diferentes níveis de segurança. O *handover* é uma característica que assegura a continuidade de uma chamada, enquanto o recurso dedicado de rádio muda dentro de uma célula (*handover* intra-célula) ou durante a travessia de uma célula para outra (*handover* inter-célula), dentro ou fora da área de controle de um comutador. Neste trabalho, os autores definem sistemas cognitivos como sendo sistemas capazes de reter conhecimento a partir das interações com o ambiente, determinar seu comportamento a partir deste conhecimento e de metas e políticas estabelecidas pelos operadores da rede, adaptar-se a estímulos externos e otimizar seu próprio desempenho [43]. No caso de redes sem fio, a cognição expressa a habilidade de selecionar dinamicamente a configuração dos dispositivos e elementos de rede, através de funcionalidades de gerência que levam em consideração o contexto de operação (características e requisitos do meio), metas e políticas (princípios), perfis dos usuários e técnicas de aprendizado (para representar e gerenciar o conhecimento). Assim, as redes cognitivas consistem em plataformas reconfiguráveis, com funcionalidades de gerenciamento inteligente, capazes de adaptar sua operação (pró-ativamente ou reativamente) em resposta a estímulos externos. Estas funcionalidades podem ser implementadas através de mecanismos que observam as condições externas, retêm o conhecimento a partir destas interações e planejam ações futuras. Este conjunto de ações forma um laço de controle (Figura 20) guiado por metas e políticas, que levam em consideração as observações do meio no planejamento de ações.

Figura 20– Laço de Controle da PBM [43].

De acordo com Demestikas [43], o gerenciamento centralizado desta infraestrutura é inviável devido à grande quantidade de elementos de rede e terminais, sendo necessária uma abordagem de gerenciamento distribuído e que empregue o conceito de auto-gerenciamento em cada elemento de rede, seguindo os princípios do gerenciamento autônômico, para prover escalabilidade, estabilidade e modularidade à arquitetura. A Figura 21 mostra as funcionalidades de gerência propostas para o gerenciamento da rede cognitiva.

Figura 21– Operação da Rede Cognitiva [43].

O sistema é composto por três parâmetros de entrada (contexto, perfil e políticas), um processo de otimização e uma base de conhecimento. Os perfis dos usuários são agrupados em classes, sendo que cada classe é caracterizada por requisitos e preferências específicas do usuário. Estas informações são armazenadas em bases de dados de tal forma que o sistema reconhece o grupo a que pertence cada usuário e possui seu histórico pessoal. Com isto, o sistema pode prever solicitações futuras de recursos da rede e serviços. O sistema de conhecimento atualiza constantemente as informações dos perfis, a partir do conhecimento adquirido em relação ao usuário, obtido nas interações anteriores. As políticas utilizadas para direcionar os processos cognitivos são divididas em dois níveis, (1) alto nível e (2) baixo nível. As primeiras são relacionadas à maximização das receitas a curto e longo prazo e as segundas estão relacionadas à otimização dos recursos de rede. O processo de cognição aqui também é empregado na avaliação da eficiência e adequação das políticas determinadas pelos operadores da rede. Por exemplo, os operadores da rede podem, a partir deste sistema, tomar conhecimento de que o provisionamento de serviços para determinado grupo de usuários, em certa região, pode levar à sobrecarga da rede ou ao aumento dos custos, ou que para outro grupo de usuários de outra região, provoca um aumento das receitas. Portanto, o aprendizado das melhores políticas é uma ferramenta valiosa proporcionada pelo sistema cognitivo aos operadores da rede.

Com relação à configuração da infraestrutura de rede, esta arquitetura envolve: a seleção do dispositivo de acesso, a faixa do espectro, a taxa de transmissão, o tipo de modulação, a potência de transmissão, a rota e a alocação de níveis ótimos de QoS. Os autores sugerem uma abordagem baseada em quatro fases para efetuar esta auto-configuração. A primeira fase consiste em identificar as diferentes configurações disponíveis no sistema, em termos de tipos de dispositivos de acesso e espectro disponível nos transceptores. A segunda e terceira fases visam explorar as capacidades de cada configuração identificada, em termos de alocação da demanda nos transceptores em função das políticas definidas pelos operadores (segunda fase) e da mais alta QoS possível (terceira fase). A quarta fase consiste na escolha da configuração mais apropriada para um dado contexto. A seguir, a

melhor configuração dentre estas quatro é escolhida, utilizando-se uma função objetivo (*Objective Function*, OF) associada à maximização da utilidade para o usuário, enquanto requer alterações mínimas nas configurações já estabelecidas.

Para auxiliar o processo de auto-configuração, uma matriz contendo diferentes configurações e suas respectivas classificações em termos de valores da OF são disponibilizadas em cada elemento de rede e uma simples busca nesta matriz revelará a configuração ótima. A Figura 22 mostra o processo de implementação desta metodologia.

Figura 22– Metodologia de Configuração Cognitiva[43].

O primeiro passo da metodologia consiste em obter a situação atual do contexto, a partir do sistema de monitoramento. Esta situação é então comparada com situações de contexto de referência disponíveis na matriz. O procedimento de identificação da situação de contexto mais próxima à do contexto atual é baseado em técnicas de reconhecimento de padrão, como por exemplo, CBR. Se um

contexto similar for encontrado na matriz, a configuração correspondente é selecionada imediatamente. Por outro lado, se o contexto atual não casa com nenhuma das referências disponíveis na matriz, uma nova solução de configuração deve ser encontrada e a matriz de configurações é atualizada com esta nova possibilidade. Assim, as técnicas de aprendizado melhoram a eficiência dos processos de decisão.

2.3.3.2. E^3 (*End-to-End Efficiency*)

Esta arquitetura foi desenvolvida no âmbito do projeto europeu E^3 do FP7 que teve início em janeiro de 2008 e finalizou em janeiro de 2010 e corresponde a uma evolução da arquitetura PBM [44]. A Figura 23 ilustra os blocos funcionais da arquitetura.

Figura 23– Arquitetura E^3 [44].

Na arquitetura E^3 , alguns blocos funcionais incluem capacidades de cognição, com técnicas de aprendizado, e são distribuídos entre os diferentes elementos de rede e em vários níveis da topologia do sistema.

- O bloco *Radio Resource Management*, inclui o *Radio Resource Management* (RRM) e o *Joint Radio Resource Management* (JRRM). Este bloco é responsável pela seleção da tecnologia de acesso rádio para cada usuário. O JRRM emprega um algoritmo de seleção que considera as

diversas tecnologias de acesso, medidas de tráfego, aspectos técnico-econômicos e requisitos de QoS.

- O bloco SON (*Self-Organizing Network*) inclui o *Dynamic Self-Organizing Network Planning Management* (DSNMP) e as funcionalidades auto-* (*self-x*) para a rede de acesso rádio. Este bloco efetua o gerenciamento de curto e médio prazo dos elementos da rede cognitiva. As características auto-* efetuam as tarefas de curto prazo, relativas à automação de tarefas operacionais nos terminais, tais como: a detecção e a compensação de interrupções de células, a otimização dos parâmetros de *handover*, a minimização de interferências entre células e o balanceamento de carga. Já o DSNPM efetua as decisões de reconfiguração da rede nos modos pró-ativo e reativo de médio e longo prazo. Estas decisões são baseadas em algoritmos de aprendizado e otimização.
- O bloco *Gerenciamento Flexível de Espectro* inclui o *Dynamic Spectrum Management /Allocation* (DSM/DSA), responsável pelas políticas de gerenciamento e alocação do espectro.
- O bloco *Reconfiguração* inclui o *Reconfiguration Control and Management* (RCM), responsável pelas decisões de reconfiguração nos elementos de rede.
- O bloco *Habilitadores de Cognição* inclui o *Cognitive Control Radio* (CCR), o *Cognitive Pilot Channel* (CPC) e o *Spectrum Sensing* (SS), que são responsáveis pelas funcionalidades de controle cognitivo do rádio e sensoriamento do espectro. O CPC é responsável pelas informações de disponibilidade de espectro.
- O bloco *Gerência Autônoma Rádio* inclui o *Autonomic Entity Management* (AEM) que corresponde à entidade autônoma de cognição controlada pelos operadores da rede via políticas. O AEM se comunica com os demais AEMs da rede, fazendo com que a arquitetura autônoma seja altamente distribuída e escalável.

As principais funções executadas por esta arquitetura são a auto-configuração da rede e a auto-otimização dos elementos cognitivos. O sistema cognitivo empregado está ilustrado na Figura 24.

Figura 24– Estrutura do Sistema de Gerenciamento Cognitivo [44].

Neste sistema, o bloco contexto é responsável pelo monitoramento dos elementos de rede reconfiguráveis gerenciados e provê informações sobre as condições atuais de tráfego na rede; o bloco perfil contém informações dos perfis dos usuários com relação a níveis de QoS e segurança acordados; o bloco funcional de políticas contém as políticas definidas pelos operadores da rede, tais como: o máximo nível de QoS permitido por serviço em função das condições de tráfego, as funcionalidades de tarifação, baseadas nos tipos de serviço e nível de QoS acordados, e os domínios fim-a-fim envolvidos. As prioridades dos serviços também podem ser configuradas neste bloco. A base de conhecimento inclui todas as funcionalidades de aprendizado envolvidas no sistema de gerenciamento e é responsável por aprender as preferências dos usuários, as características dos problemas ocorridos no passado e as soluções correspondentes encontradas pelos procedimentos de otimização. No bloco de negociação e seleção é que os procedimentos de otimização ocorrem e o bloco de solicitação provê a cooperação entre diversas operadoras de rede. Por fim, os elementos reconfiguráveis incluem os componentes de *hardware e software* dos elementos de rede gerenciados.

Em [44], os autores apresentam os resultados de uma simulação envolvendo alguns dos blocos funcionais desta arquitetura. O primeiro resultado diz respeito ao bloco DSNPM, que tem como metas produzir as reconfigurações necessárias:

- Na camada de aplicação, relacionadas aos níveis de QoS acordados;
- Na camada de rede, relacionadas à distribuição do tráfego para transceptores e terminais de acesso e

- Na camada física, relacionadas ao número de transceptores envolvidos nas decisões, aos terminais de acesso a serem ativados, à seleção do espectro e configuração dos parâmetros do rádio, etc.

O bloco DSNPM contém um algoritmo de casamento de contexto denominado CMA (*Context Matching Algorithm*) que verifica se as condições atuais do ambiente (tráfego, mobilidade, sessões dos usuários, etc.) já ocorreram no passado. Com isto, o DSNPM é capaz de auto-organizar seu comportamento para se adaptar às condições do ambiente, com base no histórico de situações ocorridas no passado. Além disso, ele é capaz de prever contextos e atuar pró-ativamente para evitar certos problemas na rede.

Os resultados das simulações deste bloco mostram que esta solução é mais eficiente que soluções que não empregam cognição em termos da quantidade de recursos gastos, consumo de potência, energia e redução de despesas operacionais (OPEX). Os gráficos mostrados na Figura 25 indicam que à medida que o algoritmo torna-se mais experiente, a probabilidade de casamento do contexto com contextos de referência aumenta e o tempo de otimização diminui [44].

A partir deste levantamento de arquiteturas de rádios cognitivos foi possível detectar algumas funcionalidades de redes cognitivas que podem ser aplicadas também às redes ópticas cognitivas, tais como:

- Modulação adaptativa;
- Sensoriamento e a alocação dinâmica e flexível do espectro;
- As funções de autoconfiguração (auto-*);
- As decisões de reconfiguração da rede nos modos pró-ativo e reativo de médio e longo prazo;
- O emprego de uma entidade autônoma de cognição controlada pelos operadores da rede via políticas, que se comunica com as demais entidades autônomas da rede, fazendo com que a arquitetura da rede seja altamente distribuída e escalável.

Atualmente, somente a modulação adaptativa está sendo plenamente utilizada em redes ópticas.

Figura 25– Resultados de Simulação do DSNMP (Adaptado de [44]).

2.3.4. Arquiteturas de Redes Ópticas Cognitivas

A inclusão de cognição nas redes ópticas visa torná-las mais dinâmicas, pró-ativas e autônomas. Este é um tema de pesquisa recente e que tem se tornando cada vez mais relevante. No momento, duas propostas de arquiteturas de redes ópticas cognitivas destacam-se a nível mundial: a *Cognition* (*Cognitive Optical Network Architecture*) e a *CHRON* (*Cognitive Heterogeneous Reconfigurable Optical Network*), descritas a seguir.

2.3.4.1. Cognition (*Cognitive Optical Network Architecture*)

A arquitetura Cognition foi proposta por Georgios S. Zervas e Dimitra Simeonidou [24] da Universidade de Bristol da Inglaterra. Esta arquitetura, mostrada na Figura 26, é composta por cinco camadas: (1) Aplicação (*Application Layer*, AL), (2) Provedora de Serviços (*Service Provider*, SP), (3) Plano de Controle (*Control Plane*, CP), (4) Controle de Acesso ao Meio (*Medium Access Control*, MAC) e Camada Física (*Physical Layer*, PL).

Figura 26– Arquitetura Cognition [24].

Na Cognition, todas as camadas da rede são reforçadas com mecanismos cognitivos. Nesta arquitetura, as metas fim-a-fim dos serviços, relacionadas aos requisitos dos usuários e aplicações, são enviadas para a camada de requisitos. Esta camada efetua a tradução destes requisitos para uma linguagem denominada CDL (*Cognition Description Language*) e então são determinados os requisitos de cada camada da arquitetura, incluindo os requisitos de otimização entre as camadas (*cross-layer*). A CDL emprega semântica e ontologias para descrever a estrutura dos recursos de rede

e os protocolos necessários para atender os requisitos do usuário para cada serviço/aplicação requisitado. Assim, na camada de aplicação, os elementos cognitivos adaptam as taxas de codificação e compressão das aplicações e a distribuição das tarefas em aplicações distribuídas (computação em nuvem – *Cloud*), em função dos requisitos especificados. Na camada de serviços, os elementos de virtualização, abstração, composição dos serviços e outros também se auto-configuram, auto-organizam e auto-otimizam-se em função destes requisitos.

O plano de controle consiste de protocolos de sinalização, roteamento, algoritmos de cálculo de rotas e topologia da rede. Neste plano, ocorre a auto-configuração e a auto-otimização das rotas, de acordo com os requisitos das aplicações e as condições da infraestrutura de rede. Na camada MAC, a alocação e agregação de canais ópticos e a formatação do quadro também são adaptados aos requisitos dos usuários e às condições da rede. Por fim, na camada física, os elementos de rede reconfiguráveis são auto-configurados e auto-otimizados em termos de formatos de modulação, taxa de transmissão, número de comprimentos de onda, potência óptica, ganho de amplificação, compensação, etc. visando garantir a QoS fim-a-fim. Na arquitetura *Cognition*, todas as camadas citadas acima seguem o ciclo cognitivo: Observa-Orienta-Planeja-Decide-Atua-Aprende (Figura 26). Já a camada de otimização *cross-layer* garante uma abordagem holística, efetuando a interação entre os ciclos cognitivos das diversas camadas.

A *Cognition* também garante a interação entre diferentes domínios e regiões (redes de acesso, redes metropolitanas e redes de núcleo), como indicado na Figura 27. Neste caso, os elementos de rede dos diferentes domínios interagem antes de tomarem decisões e efetuarem ações. Esta interação é limitada, para garantir um tempo de convergência adequado e, acordos entre os diferentes provedores devem firmados, para se garantir a confiabilidade nas interações e a proteção da rede.

Figura 27– Arquitetura Multi-Domínios *Cognition* [24].

Cada nó de rede de uma determinada região (ou domínio) segue seu próprio ciclo cognitivo e o estado *Orienta* de cada ciclo cognitivo individual, ou seja, de cada região, alimenta também um ciclo cognitivo responsável por todo o domínio. Este, por sua vez, aciona o estado *Atua* de todos os ciclos cognitivos individuais. Para fazê-lo, o ciclo cognitivo de domínio considera as informações coletadas de todos os elementos (nós) da rede e, quando a rede se expande para vários domínios ou várias regiões, estes elementos interagem entre si antes de acionar o estado *Atua* dos ciclos cognitivos individuais.

A estrutura do nó óptico cognitivo desta arquitetura está ilustrada na Figura 28 e consiste de *transponders* reconfiguráveis nas terminações da rede e de elementos de comutação óptica (*Optical Cross-Connects*, OXCs) com diversas granularidades de comutação no núcleo da rede. O módulo dos *transponders* é composto por transmissores e receptores na camada física. Esta camada é capaz de reconfigurar e adaptar as funcionalidades dos *transponders*, tais como a taxa de transmissão, a taxa de símbolo, o formato de modulação, o comprimento de onda (s), o nível de potência. Esta operação pode ser feita de forma autônoma para responder às condições do meio óptico. No entanto, estas possibilidades de reconfiguração devem considerar também a interação com os demais nós de rede. Na camada MAC (*Medium Access Control*), prevê-se também o uso de protocolos MAC reconfiguráveis, a alocação de banda flexível (por exemplo, sob diferentes condições de carga de rede, número e tipo de aplicações transferidas, tipo de camada física disponível). Na camada de plano de controle, os protocolos de sinalização e roteamento são responsáveis pela auto-configuração e auto-cura da rede, modificando dinamicamente os recursos de rede e divulgando informações sobre a disponibilidade destes recursos para todos os elementos de rede. No nível superior, no plano de serviço cognitivo, virtualizações de banda são previstas para que a rede se adapte aos requisitos dos serviços e às condições de disponibilidade de recursos. Por fim, o módulo de comutação do nó óptico (OXC) segue basicamente a mesma abordagem do módulo dos *transponders*.

Figura 28– Arquitetura de um Nó Cognitivo da Cognition [24].

2.3.4.2. CHRON

O projeto CHRON é um projeto europeu do FP7 [45] que teve início em julho de 2010 e terminou recentemente, sendo um dos principais projetos da área de redes ópticas cognitivas. Este projeto tem como objetivo principal prover maior inteligência e autonomia ao plano de controle através da utilização de processos cognitivos. Este projeto visa solucionar algumas questões, dentre as quais se destacam:

- Como rotear novas demandas de tráfego sobre as conexões ópticas existentes ou sobre novas conexões ópticas?
- Como configurar os elementos de rede em termos de comprimentos de onda, ocupação do espectro, formato de modulação, taxa de transmissão, etc.?
- Como garantir a eficiência energética na operação da rede?

A solução destas questões deve considerar a QoS requisitada em cada demanda, a QoT, a situação atual da rede e o conhecimento adquirido através de experiências anteriores. O elemento central da arquitetura CHRON é um Sistema de Decisão Cognitivo (SDC), complementado por um sistema de monitoramento da rede, que provê medidas da qualidade da transmissão do sistema óptico e das condições do tráfego, e mecanismos de controle e gerência para implementar as decisões tomadas pelo sistema de decisão cognitivo. A interação entre estes componentes está ilustrada na Figura 29.

Figura 29– Arquitetura CHRON [45].

Para lidar com estas múltiplas tarefas, o SDC é subdividido em cinco módulos, como mostra a Figura 30.

Figura 30– Blocos Funcionais da Arquitetura Centralizada CHRON [47].

- (1) Um módulo RWA/RWSA, para o cálculo das rotas e atribuição de comprimento de onda em redes com grades fixas (*Routing and Wavelength Assignment, RWA*) e para cálculo das rotas, atribuição de comprimento de onda alocação de espectro (*Routing, Wavelength and Spectrum Assigment, RWSA*) bem como determinar o formato de modulação em redes ópticas adaptativas.
- (2) Um módulo estimador de QoT, utilizado para a predição da QoT dos *lightpaths* antes de serem estabelecidos na rede, bem como o impacto dos mesmos sobre conexões existentes. Este módulo verifica a QoT real (que é fornecida por monitores de rede) e usa essa informação para melhorar o desempenho do módulo em estimativas futuras.

- (3) Um módulo de topologia virtual, que é responsável por conceber a topologia virtual, ou seja, o conjunto de *lightpaths* a ser estabelecido na rede. Este módulo também é utilizado para otimizar o desempenho da rede, reorganizando as conexões existentes;
- (4) Um módulo de multiplexação de tráfego (*grooming*) de que é encarregado de agregar conexões de sub-comprimentos de onda, como, por exemplo, o tráfego TDM em *lightpaths* que compõem a topologia virtual e
- (5) Um módulo de planejamento e decisão que recebe as solicitações dos usuários e determina como atendê-los usando as funcionalidades oferecidas pelos outros módulos. Este módulo também executa funcionalidades de predição para disparar ações pró-ativas de otimização de rede, tais como reconfiguração da topologia ou restauração pró-ativa.

No CHRON, dois tipos de arquitetura são considerados para fins de testes de escalabilidade:

- Arquitetura centralizada, na qual o sistema de decisão cognitivo é centralizado e o plano de controle é distribuído e
- Arquitetura distribuída, na qual o sistema de decisão cognitivo e o plano de controle são distribuídos. Neste caso, todos os nós da rede incluem cognição. No entanto, as informações de monitoramento da rede são coletadas e distribuídas por um sistema de gerenciamento centralizado.

Na arquitetura centralizada, o SDC é localizado apenas num elemento de rede, denominado nó de controle. Este sistema é mostrado na Figura 31 e inclui os cinco módulos citados acima, uma interface de usuário para receber as solicitações de conexões dos clientes e interfaces com o plano de controle e com o sistema de monitoramento. Estes módulos são associados às bases de conhecimento (*Knowledge Bases*, KBs), que por sua vez são conectadas aos processos cognitivos através dos módulos de aprendizado.

A arquitetura centralizada é composta basicamente por quatro planos, mostrados na Figura 31.

Figura 31–Arquitetura Centralizada CHRON [47].

- Plano de transporte (*Transport Plane*, TP), composto por roteadores, OXCs e amplificadores, que possuem interface com o plano de gerência;
- Plano de gerência (*Management Plane*, MP), que inclui uma base de dados de engenharia de tráfego global (*Global Traffic Engineering Database*, GTED), contendo informações relativas à topologia da rede, comprimentos de onda disponíveis em cada enlace, caminhos ópticos estabelecidos e seus parâmetros e uma base de dados global da camada física (*Global Physical Parameter Database*, GPPD), contendo informações sobre as fibras ópticas e os valores dos parâmetros de degradação da camada física (tais como, dispersão cromática (*Chromatic Dispersion*, CD), FWM (*Four Wave Mixing*), PMD (*Polarization Mode Dispersion*), XPM (*Cross-Phase Modulation*), etc.).
- Plano de Controle (*Control Plane*, CP), que consiste em extensões do plano de controle padrão GMPLS [46] tais como OSPF-TE e o RSVP-TE. O OSPF-TE (*Open Shortest Path First - Traffic Engineering*) é um protocolo de roteamento com extensões de engenharia de tráfego e o RSVP-TE (*ReSerVation Protocol – Traffic Engineering*) é um protocolo de sinalização. Após o cálculo da rota pelo OSPF-TE, o protocolo de sinalização RSVP-TE estabelece o caminho em todos os nós pertencentes à rota. Estas extensões operam sobre os controladores de conexões elétricas (*Electrical Connection Controllers*) dos roteadores e sobre os

controladores de conexões ópticas (*Optical Connection Controllers*) dos OXCs. O plano de controle interage com o plano de transporte através da interface CMI (*Connection and Management Interface*).

- Plano de conhecimento (*Knowledge Plane*, KP), que contém o sistema de decisão cognitivo, que toma decisões e atua sobre o plano de transporte, através da interface CKI (*Control Knowledge Interface*) ou MKI (*Management Knowledge Interface*).

Na arquitetura centralizada, o projeto CHRON prevê cinco tipos de casos de uso (*Use Case – UC*) do sistema de decisão cognitivo:

1. **UC#1: Estimativa da QoT em redes ópticas heterogêneas:** neste caso, o SDC é empregado para predição da QoT em conexões ópticas a serem estabelecidas (novas) e também nas conexões existentes, devido à influência das novas conexões sobre as conexões existentes. Para isto, são analisados os parâmetros de degradação da camada física;
2. **UC#2: Estabelecimento de conexões ópticas:** neste caso, o SDC é empregado para a determinação da rota, da alocação do espectro, levando em consideração a escolha do formato de modulação, a faixa disponível no espectro, os parâmetros de degradação da camada física, a utilização de recursos, o consumo de energia e o atraso fim-a-fim. O objetivo deste caso de uso é efetuar uma otimização multiobjetivos, considerando todos os parâmetros citados acima, visando minimizar a probabilidade de bloqueio e/ou o atraso no estabelecimento da conexão, enquanto garante os requisitos de QoS.
3. **UC#3: Agregação do tráfego de múltiplas camadas dinamicamente:** nesse caso, o SDC é empregado para: (1) selecionar um caminho óptico, (2) modificar os parâmetros de um caminho óptico existente ou (3) estabelecer um novo caminho óptico sobre a topologia de rede virtual para acomodar uma nova demanda de sub-comprimento de onda.
4. **UC#4: Otimização da rede (qualidade do sinal e recursos ópticos):** neste caso, o SDC é empregado para determinar quando e como executar procedimentos de otimização da rede visando uma melhoria da qualidade do sinal e uma melhor utilização dos recursos de rede. As ações deste caso consistem em: (1) rearranjar as rotas, (2) modificar os parâmetros das conexões ópticas existentes, (3) realocar o espectro ou ainda (4) realocar os comprimentos de

onda. Esta é uma ação pró-ativa para acomodar as demandas futuras de novas conexões ou modificar as rotas existentes.

- 5. UC#5: Otimização da rede (otimização do tráfego):** neste caso, o SDC é empregado para otimizar a agregação do tráfego de sub-comprimentos de onda (TDM, Ethernet, etc.). As ações neste caso incluem: (1) rearranjar o tráfego das conexões ópticas existentes, (2) modificar os parâmetros das conexões ópticas existentes, por exemplo, a taxa de transmissão, ou (3) reconfigurar a topologia virtual. Para isso, é necessário efetuar a predição das novas demandas de tráfego, tendo por base o histórico das demandas e os dados de monitoramento.

Na arquitetura distribuída, ilustrada na Figura 32, são utilizados praticamente os mesmos blocos funcionais da arquitetura centralizada, exceto o da topologia virtual. O SDC é distribuído em todos os nós da rede, mas a informação de monitoramento do tráfego é coletada e distribuída por um sistema de gerenciamento centralizado.

Figura 32– Blocos Funcionais da Arquitetura CHRON Distribuída [47].

A Figura 33 mostra a estrutura de planos da arquitetura distribuída, onde cada elemento de rede possui seu próprio sistema de decisão cognitivo.

A Figura 34 mostra os elementos constituintes do SDC e sua relação com o sistema de monitoramento da rede, plano de controle e plano de gerência. O ciclo cognitivo se inicia com o sistema de monitoramento observando a rede (Observa) e armazenando os dados coletados numa base de dados genérica. O processo cognitivo acessa esta base para coletar as informações necessárias para a tomada de decisões (Orienta e Decide). As decisões são comunicadas ao plano de controle e ao sistema de gerência para execução (Ação). O SDC interage com o módulo de aprendizado, que por sua vez atualiza uma base de conhecimento.

Figura 33–Arquitetura Distribuída CHRON [47].

Figura 34– Ciclo Cognitivo da Arquitetura CHRON [47].

A seguir, na Figura 35, é apresentado um mapa das tarefas a serem realizadas pelo sistema cognitivo do CHRON. Este mapa inclui as entradas consideradas pelo sistema cognitivo, as ações consequentes e os objetivos a serem alcançados. Além disso, descreve de forma resumida alguns cenários de rede e requisitos de QoS.

Continua na página seguinte

Figura 35 – Sistema Cognitivo da CHRON [47].

De acordo com Tomkos [45], neste projeto, a vantagem da utilização da cognição tem sido demonstrada em diversos cenários, tais como: (1) na avaliação da qualidade de transmissão das conexões ópticas (2), na determinação de um conjunto de conexões ópticas a ser estabelecido na rede

para suportar a carga de tráfego, satisfazer os requisitos de QoT, minimizar o consumo de energia e minimizar o congestionamento.

No cenário (1), foi desenvolvido um estimador de QoT [48] baseado em dois métodos de IC: o CBR convencional e uma abordagem híbrida de CBR com limiares de decisão, chamada FixE-CBR. O modo de operação do método CBR convencional consiste nos seguintes passos. Primeiro, um número de casos conhecidos formados pelos pares: comprimento da rota e respectivo fator Q são armazenados em uma base de dados. A seguir, quando uma solicitação de estabelecimento de *lightpath* chega ao plano de controle, primeiramente o comprimento da rota é calculado. Então, o algoritmo CBR é aplicado para recuperar da base de dados um caso similar a este, com o mesmo comprimento de rota. Então, a QoT recuperada deste caso é utilizada como a QoT da nova solicitação e avaliada para se verificar se atende ou não aos requisitos. Por outro lado, o FixE-CBR opera da seguinte maneira. Se o comprimento da rota for menor que um determinado limiar inferior (~1.250 km), assume-se que o requisito de QoT é atendido; se o comprimento da rota for maior que um determinado limite superior (~ 4.100 km), assume-se que o requisito de QoT não é atendido; e se o comprimento da rota pertence a uma área de incerteza, entre os limiares inferior e superior, então o algoritmo CBR é aplicado para recuperar da base de dados um caso similar a esta nova solicitação. A Figura 36 mostra o fator Q de diferentes *lightpaths* em função de seu comprimento total e a área de incerteza, entre os limiares inferior e superior citados acima. A utilização de limiares tem como objetivo agilizar a avaliação da QoT dos *lightpaths* para operação em tempo real. Estes valores foram obtidos da simulação da rede GÉANT2 [48] equipada com 32 comprimentos de onda e com transmissores ópticos operando a 10 Gbit/s OOK, para diferentes cargas de rede.

Em [48] foi demonstrado que a utilização da técnica CBR convencional tornou a estimação da QoT duas ordens de grandeza mais rápida do que uma ferramenta denominada Q-Tool [18], que não emprega cognição. Por sua vez, a técnica FixE-CBR é uma ordem de grandeza mais rápida do que a CBR convencional, portanto, três ordens de grandeza mais rápida que o Q-Tool. Como mostrado em [48], o tempo computacional para a ferramenta Q-Tool estimar a QoT de um caminho óptico é de 768,7 ms, para o CBR convencional 6,6 ms e quando FixE-CBR é usado, 0,5 ms, demonstrando assim o ganho na utilização cognição. No entanto, de acordo com [48], mesmo quando o FixE-CBR é utilizado, os casos armazenados na base de dados precisam de otimizações periódicas utilizando-se técnicas aprendizado e esquecimento para manter o desempenho do algoritmo quando o número de casos aumenta. Além disso, de acordo com [26], para um problema com n parâmetros correlacionados, a abordagem CBR dá a mesma importância para todos os parâmetros. A opção de atribuir pesos

diferentes para cada parâmetro pode ajudar neste caso, mas pode ser suficiente para considerar a interdependência entre os mesmos e técnicas adicionais têm que ser utilizadas.

Figura 36 – Fator Q dos *lightpaths* em função de seus comprimentos [48].

Assim, técnicas de IC que superem estas limitações são relevantes para as redes ópticas cognitivas.

O cenário (2) consiste na inclusão de um algoritmo de otimização multiobjetivos, para determinar um conjunto ótimo de topologias virtuais com diferentes graus de QoT e consumo de energia. Os resultados de simulação mostram que à medida que o número de rodadas de simulação aumenta, o sistema adquire um histórico dos eventos passados e um número maior de possibilidades de topologias virtuais com diferentes graus de QoT (% soluções) é encontrada, quando comparado ao sistema tradicional, sem cognição, como mostra a Figura 37.

Figura 37– Comparação de Desempenho dos Algoritmos Cognitivos da CHRON e Não Cognitivos [45].

Outro cenário apresentado em [22] consiste em estabelecer, de forma proposital, um *lightpath* numa rota onde a qualidade de transmissão não é boa. Então, os mecanismos do plano de controle detectam que a BER está alta, liberam a conexão, estabelecem uma rota alternativa com a qualidade adequada e atualizam a informação de que a QoT não está boa para aquela rota na base de dados e empregam esta informação em ações futuras. Na Figura 38, um *lightpath* é estabelecido entre os nós de rede A e D passando por B (ABD) e a fibra é desconectada entre os nós A e B, gerando um alarme.

Figura 38 – Topologia de Teste. Adaptada de [22].

Então, o estimador de QoT avalia a qualidade de transmissão da rota ACBD e estima (erroneamente) que está dentro dos limites e o *lightpath* é restaurado através dos nós ACBD. No entanto, como a estimativa foi falsa, o alarme de BER alta volta a disparar e o *lightpath* tem que ser restabelecido através de outro caminho (nós ACD). O sistema cognitivo aprende com esta situação que a rota ACBD não possui uma boa QoT e insere esta informação na base de dados. Quando ocorre uma situação similar (lado direito da Figura 39) e a fibra é novamente rompida entre os nós A e B, o sistema já encontra a melhor rota (ACD), reduzindo assim o tempo para restauração do *lightpath* em 48%.

Figura 39 – Diagrama de Tempo com a redução do tempo de recuperação de falhas. Adaptada de [22].

2.4. Padronização

Diversos organismos de padronização têm reconhecido a necessidade e o potencial de introduzir os conceitos de cognição no processo de normatização e estão atualizando alguns padrões e/ou criando novos. No momento, a maior parte do trabalho de padronização tem foco em redes de acesso sem fio e rádios cognitivos. Por exemplo, o IEEE *Technical Sub-Committee on Cognitive Networks* (TCC) [48] tem como objetivo elaborar padrões para alocação dinâmica de espectro para rádios cognitivos com características de segurança e baseado em políticas. O padrão IEEE 802.21 [50]

visa prover *handover* e interoperabilidade em redes heterogêneas e o padrão IEEE 802.22 [51] está relacionado à operação de rádios cognitivos na faixa de espectro antes alocada para difusão terrestre de TV. Já o padrão IEEE 802.16m [52] define requisitos para as redes móveis de quarta geração (4G) e um destes requisitos é a capacidade de auto-organização. Os mecanismos definidos são a auto-configuração dos elementos de rede e a auto-otimização da rede com relação à disponibilidade dos serviços, QoS e vazão.

Outra iniciativa representativa no sentido da padronização é o *Cost Action IC0902* [53] direcionado ao estudo, a médio prazo, e à padronização, a longo prazo, de redes cognitivas.

Com relação às redes ópticas, o padrão ITU-T G.694.1 [54] define uma grade flexível de espectro para os equipamentos WDM, um dos princípios empregados nas redes ópticas de próxima geração. Além disto, existem três *drafts* do IETF relativos a: (1) extensões do OSPF para suportar alocação de comprimentos de onda em grade flexível [55], (2) extensões do RSVP-TE para grade flexível [56] e (3) alocação de supercanais em grade flexível [57].

Dessa forma, existem oportunidades para criação de novos padrões relativos a redes ópticas cognitivas.

2.5. Considerações Finais sobre os Conceitos e Arquiteturas de Redes Cognitivas

De um modo geral, através deste levantamento do estado da arte, foi possível observar que a área de redes ópticas cognitivas se encontra atualmente num estágio embrionário de desenvolvimento e ainda não há um consenso sobre um modelo de referência de arquitetura para tais redes [58]. De acordo com Facchini [58], o modelo de Thomas *et al.*, por exemplo, é bastante completo pois abrange características de extensibilidade, flexibilidade e pró-atividade à arquitetura, mas não são impostos limites para o sistema, nem são definidas métricas de desempenho, em função de alguma característica intrínseca do sistema cognitivo.

Em [58], Facchini também faz as seguintes considerações:

- Em geral são empregadas técnicas de aprendizado e raciocínio tais como reconhecimento de padrão e algoritmos de otimização com múltiplos objetivos não sendo justificadas as razões de tais escolhas;

- A capacidade de aprendizado, com a geração de novas inferências a partir da correlação entre as informações existentes nas entidades cognitivas, não é explorada;
- O foco principal dos trabalhos é de ordem prática, não havendo uma análise mais aprofundada dos aspectos teóricos envolvidos na cognição.

Assim, o desenvolvimento de um algoritmo de aprendizado e tomada de decisão que leve em consideração estes quesitos, é bastante oportuno no momento atual e será discutido nos próximos capítulos.

Capítulo 3

Fuzzy C-Means

Este Capítulo apresenta as técnicas de inteligência computacional FCM e CBR, investigadas nesta tese para aplicação em redes ópticas de próxima geração. A escolha de uma técnica de IC adequada é fundamental para se obter ganhos com o uso da cognição. Este Capítulo inicia com a descrição do modo de funcionamento da lógica *fuzzy* e, a seguir, uma breve descrição do método de agrupamento de dados *C-Means*, uma vez que o FCM consiste na junção destes dois métodos. A seguir, é apresentada a técnica FCM, testes de validação dos resultados do FCM e a técnica CBR.

3.1. Lógica *Fuzzy*

A lógica *fuzzy* difere da lógica booleana em que um elemento pertence ou não a um conjunto. Na *fuzzy*, uma pertinência parcial é permitida, ou seja, um elemento pode pertencer a um conjunto num certo grau [60]. Este grau de pertinência é representado por um número real no intervalo $[0, 1]$, onde o valor "1" é para estritamente membros, o valor "0" para "não-membros" e os valores no intervalo $]0,1[$ são para representar a transição entre esses extremos. Um conjunto A no universo U tem uma função de pertinência dada por:

$$\mu_A : U \rightarrow [0,1]$$

Para todo $u \in U$ existe uma função de pertinência $\mu_A(u)$. As funções de pertinência mais comumente empregadas são as do tipo triangular, trapezoidal e gaussiana, devido à sua simplicidade.

A Figura 40 ilustra três funções de pertinência triangulares usadas como entrada.

Figura 40 – Exemplos de Funções de Pertinência Lógica Fuzzy.

A lógica *fuzzy* é simples e eficiente e é usada para encontrar soluções precisas a partir de entradas vagas.

A lógica *fuzzy* pode ser utilizada para inferência. Um controlador fuzzy usa o raciocínio fuzzy para tomar decisões. Neste caso, as entradas e saídas do sistema são comumente de natureza *crisp* e um processo de fuzzificação e defuzzificação é necessário para traduzi-los para a representação fuzzy, como mostra a Figura 41. O termo *crisp* é usado para indicar variáveis que têm os valores exatos, em oposição ao termo fuzzy, cujos valores são qualitativos.

Figura 41 – Arquitetura básica de um controlador Fuzzy. Adaptado de [60].

Na Figura 41, a base de conhecimento define a relação entre os parâmetros de entrada e saída e sua representação na lógica *fuzzy* através das funções de pertinência. De um ponto de vista prático, cada variável de entrada e saída é caracterizada por um conjunto de atributos linguísticos e, para cada atributo, uma função de pertinência é definida. Como exemplo, se OSNR em dB, é uma variável de entrada do sistema, é possível escolher os atributos como alta, média ou baixa e definir uma função de pertinência para cada um destes atributos.

O conjunto de regras de decisão é o coração do controlador *fuzzy*. O formato de uma regra possui uma parte premissa e uma parte consequente do tipo:

$$\begin{aligned} & \text{Se } x \text{ é } A \text{ (premissa),} \\ & \text{Então } y \text{ é } B \text{ (consequente),} \end{aligned}$$

sendo x e y as variáveis de entrada e saída, respectivamente, e A e B são os atributos associados aos conjuntos fuzzy que descrevem linguisticamente essas variáveis.

O seguinte exemplo demonstra o modo de operação do controlador *fuzzy* [60] [61]. Sejam duas variáveis de entrada X e Y e uma variável de saída Z , sendo seus atributos linguísticos: X_1, X_2 para X , Y_1, Y_2 para Y e Z_1, Z_2 para Z , respectivamente. As regras de decisão são:

$$\begin{aligned} & \text{Se } X \text{ é } X_1 \text{ e } Y \text{ é } Y_1 \text{ então } Z \text{ é } Z_1 \\ & \text{Se } X \text{ é } X_2 \text{ e } Y \text{ é } Y_2 \text{ então } Z \text{ é } Z_2 \end{aligned}$$

Sejam também x e y os valores exatos de X e Y e $\wedge$ e $\vee$ os operadores lógicos E (AND) e OU (OR). O primeiro passo consiste em calcular α_i para cada regra dada:

$$\alpha_1 = \mu_{X_1}(x) \wedge \mu_{Y_1}(y) \quad (1)$$

$$\alpha_2 = \mu_{X_2}(x) \wedge \mu_{Y_2}(y) \quad (2)$$

Então, calcula-se:

$$\mu'_{z_1} = \alpha_1 \wedge \mu_{z_1} \quad (3)$$

$$\mu'_{z_2} = \alpha_2 \wedge \mu_{z_2} \quad (4)$$

O passo final é determinar o valor máximo entre as saídas das regras, isto é:

$$\mu_z = \mu_{z_1} \vee \mu_{z_2} \quad (5)$$

A desfuzzificação é o processo de determinar um valor *crisp* (exato) para a saída. Existem diversos métodos de desfuzzificação, tais como: (1) Centro de Área (*CDA*), no qual o valor numérico obtido representa o centro de gravidade da distribuição de possibilidade de saída do sistema *fuzzy*, (2) Média dos Máximos (*MDM*), que produz um valor numérico que representa o valor médio de todos os valores centrais ativados e (3) Primeiro Máximo (*MPM*), que produz um valor numérico igual ao primeiro máximo valor ativado (adequado quando a forma da distribuição de possibilidade tem um pico), entre outros [62].

Como exemplo, a lógica *fuzzy* foi utilizada em [63] para avaliar se os caminhos ópticos estão adequados, em termos de qualidade de transmissão, para serem estabelecidos na rede e também para reconfigurar o formato de modulação, caso a qualidade esteja degradada. A cada solicitação de conexão que chega ao plano de controle, uma rota e um comprimento de onda são calculados utilizando-se um algoritmo *RWA* (*Routing and Wavelength Assignment*) convencional, ou seja, calcula-se uma rota baseada no caminho mais curto e um comprimento de onda em cada enlace. A seguir, os dados de degradação da camada física, oriundos dos sensores, armazenados previamente numa base de dados denominada *PLID* (*Physical Layer Impairments Database*), são utilizados pela lógica *fuzzy* para verificar se estão adequados para a rota e comprimento de onda calculados, tamanho do enlace e taxa de transmissão solicitada na requisição. Caso os mesmos estejam dentro dos limiares pré-fixados, a conexão é estabelecida. Caso contrário, uma nova configuração é testada na mesma rota, empregando agora um formato de modulação mais robusto. Se esta nova configuração mostrar-se adequada, a rota é estabelecida e um comando é gerado no sistema *fuzzy* para configurar este novo formato de modulação nos equipamentos de rede. O algoritmo foi desenvolvido considerando-se como efeito de degradação da camada física, a dispersão por modo de polarização (*PMD*). O parâmetro *PMD* foi escolhido por variar de forma não determinística e ser dependente da taxa de transmissão (*B*) e do comprimento do enlace (*L*) de acordo com:

$$B \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^M D_{PMD}^2 \cdot L(k)} \leq a \quad (6)$$

onde, D_{PMD} representa a PMD, $L(k)$ é o comprimento do enlace, k representa um enlace que faz parte do caminho escolhido e α é uma fração da duração do bit ($T = 1/B$), com um valor típico aceitável de 0,1, definido pelo ITU-T [64]. A utilização da lógica *fuzzy* para verificação dos limiares de degradação da camada física tende a tornar o sistema mais flexível na aceitação das solicitações de conexões, como ilustra a Figura 42. À medida que os recursos de rede vão ficando escassos devido à quantidade de tráfego elevada na rede, o algoritmo FC-RWA (*Fuzzy Controller-RWA*), que emprega *fuzzy*, apresenta menor probabilidade de bloqueio quando comparado ao PLIA-RWA (*Physical Layer Impairment Aware – RWA*), com modelo analítico, em toda faixa de variação do atraso diferencial de grupo, τ , considerado. A D_{PMD} está associada a τ e ao comprimento do enlace (L) pela equação:

$$D_{PMD} = \frac{\tau}{\sqrt{L}} \quad (7)$$

Figura 42 – Probabilidade de bloqueio em função do atraso diferencial de grupo.

Outro exemplo de uso da lógica *fuzzy* para aplicação em redes ópticas é apresentado em [65]. Neste exemplo, a lógica *fuzzy* é utilizada para auto-configuração auto-cura em redes ópticas cognitivas numa arquitetura *cross-layer*. Um controlador *fuzzy* centralizado é implementado e recebe informações de diversas camadas de rede (IP, OTN e Óptica), tomando decisões de configuração e reconfiguração

dos caminhos ópticos com base nestas informações. Os resultados mostram que a lógica *fuzzy* é flexível e possibilita decisões rápidas e consistentes no plano de controle.

3.2. Métodos de Agrupamento

Um método de agrupamento é utilizado para agrupar elementos de um determinado conjunto em diferentes grupos (*clusters*) em função de sua similaridade a algum atributo. Estes métodos são caracterizados pela aplicação de um algoritmo de aprendizado não supervisionado, ou seja, as próprias informações dos atributos dos elementos do conjunto são utilizadas para efetuar as partições em diferentes grupos. O conceito de partição aqui se refere à divisão de um conjunto em subconjuntos não vazios (grupos).

Métodos de agrupamento têm sido utilizados em diversas aplicações, tais como mineração de dados, segmentação de imagens, reconhecimento de padrões, bioinformática, medicina, entre outras [66].

A Figura 43 ilustra um exemplo de agrupamento de dados no qual o número de grupos ou clusters (K) é o parâmetro a ser ajustado. Dependendo do critério a ser utilizado para a partição do conjunto, é possível obter diferentes agrupamentos para um mesmo conjunto de dados.

Figura 43 – Exemplo de Agrupamento de Dados. Adaptado de [66].

O principal objetivo dos métodos de agrupamento, é revelar os padrões dos grupos e extrair conclusões úteis sobre os mesmos. Em alguns destes métodos, a alocação inicial dos elementos do conjunto aos grupos é aleatória, enquanto em outros existem regras específicas para isso. Após este

passo inicial, várias iterações ocorrem até que não haja uma diferença significativa entre a alocação atual e a anterior.

O processo de agrupamento consiste em quatro fases: (1) seleção ou extração de atributos, (2) escolha do tipo de algoritmo de agrupamento, (3) validação dos grupos e (4) interpretação dos resultados [66]. Na etapa 1, são escolhidos os atributos mais relevantes, dentre os vários pertencentes ao conjunto, e são efetuadas transformações nos mesmos para gerar atributos adequados, a partir dos atributos originais selecionados. A escolha do tipo de algoritmo (fase 2) é essencial para se garantir que o mesmo forneça bons resultados para o problema a ser analisado. Nesta etapa, também deve ser escolhida uma métrica de similaridade ou dissimilaridade a ser utilizada para o cálculo da distância de cada elemento do grupo ao centro dos clusters. A seguir, uma função objetivo deve ser definida para se estipular o critério a ser utilizado para o cálculo das partições. Além disso, é preciso avaliar se o número de partições encontrado pelo algoritmo é adequado. Esta avaliação é realizada na fase 3, com base em critérios de avaliação objetivos. Por fim, na fase 4, são gerados os resultados a serem utilizados para resolver os problemas encontrados.

Existem dois tipos de métodos de agrupamento: hierárquico e particional. No tipo particional, o objetivo é encontrar uma partição com K clusters em um conjunto de dados com N elementos. Já no agrupamento hierárquico, existe uma sequência aninhada de agrupamentos particionais. O algoritmo FCM, foco deste trabalho, é do tipo particional.

Formalmente, dado um conjunto de dados $X = \{x_1, \dots, x_n\}$, uma partição de X em K clusters é definida por: $C = \{C_1, C_2, \dots, C_K\}$ com $K < N$, tal que:

1. $C_j \neq \emptyset, j = 1, \dots, K$ (todos os clusters contém pelo menos um elemento)
2. $\bigcup_{j=1}^K C_j = X$ (todos os elementos pertencem a algum grupo)
3. $C_j \cap C_l = \emptyset, j, l = 1, \dots, K$ (cada elemento pertence exclusivamente a um único grupo)

Este tipo de agrupamento é chamado *hard* ou *crisp*, pois um elemento pertence ou não pertence a um determinado cluster. No caso do FCM, um elemento pode pertencer a mais de um cluster ao mesmo tempo, com um determinado grau de pertinência, sendo relaxada a condição 3. O FCM será detalhado no item 3.3.

3.2.1. Medidas de Similaridade

Os métodos de agrupamento utilizam medidas de similaridade ou dissimilaridade entre os elementos do conjunto durante a fase de partição do conjunto em grupos. A dissimilaridade entre dois elementos x e y , pertencentes a um conjunto X , é denominada $d(x, y)$ a qual deve ser um valor real e simétrico:

$$d(x, y) = d(y, x), \text{ para todo } x, y \in X \quad (8)$$

Valores pequenos de $d(x, y)$ significam que x e y são próximos e valores grandes de $d(x, y)$ significam que x e y são distantes. A dissimilaridade deve satisfazer as seguintes condições:

- (i) $d(x, y) \geq 0$, para todo $x, y \in X$;
- (ii) $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$ para todo x, y e z de X ;
- (iii) $d(x, y) = 0$ se e somente se $x = y$.

Este tipo de medida é também chamada métrica e uma das métricas mais utilizadas para se calcular a distância de um elemento do conjunto X ao centro do cluster ao qual pertence é a distância Euclidiana, dada por:

$$d_E(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^2} \quad (9)$$

3.3. Algoritmo FCM

O FCM é um algoritmo híbrido, resultante da combinação da lógica *fuzzy* com um método de agrupamento de dados. A seguir, é apresentada a descrição formal do FCM baseada em [32]. No FCM, um elemento pode pertencer a mais de um cluster ao mesmo tempo, com um determinado grau de pertinência μ_{ij} , representando o grau de pertinência do elemento x_i ao cluster C_j , o qual indica quão fortemente o elemento está ligado ao cluster [66]. No FCM, nenhum cluster pode ficar vazio. Esta restrição é descrita formalmente como:

$$0 < \sum_{i=1}^N \mu_{ij} < N, \forall j \quad (10)$$

Na Eq. (10), o limite superior impede que um cluster contenha todos os elementos com grau de pertinência 1, o que não seria possível sem deixar os outros clusters vazios. Da mesma forma,

nenhum elemento pode ficar sem um cluster e a soma total dos graus de pertinência de um elemento deve totalizar 1, como indica a Eq.(11).

$$\sum_{j=1}^K \mu_{ij} = 1, \forall j \quad (11)$$

O algoritmo FCM busca minimizar a seguinte função objetivo [32]:

$$J = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K (\mu_{ij})^m d_E(x_i; c_j)^2 \quad (12)$$

onde:

- $m > 1$ é o fator de fuzzificação, que indica quão nebuloso os conjuntos serão. Valores tipicamente utilizados por apresentarem bons resultados são $m = 1,25$ e $m = 2,0$ [31];
- c_j é o centro do j-ésimo cluster;
- $d(x_i; c_j)$ é a distância Euclidiana entre x_i e c_j ;

Seja $D(x_i; c_j) = d_E(x_i; c_j)^2$, então:

$$J = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K (\mu_{ij})^m D(x_i; c_j) \quad (13)$$

Para minimização da função J com relação a μ_{ij} , sob a restrição $\sum_{j=1}^K \mu_{ij} = 1$, será utilizado o multiplicador de Lagrange $\lambda_i, i = 1, 2, \dots, N$ da seguinte forma:

$$L = J + \sum_{i=1}^N \lambda_i \left(\sum_{j=1}^K \mu_{ij} - 1 \right) \quad (14)$$

Para a condição de otimização, L será diferenciado com relação a μ_{ij} ,

$$\frac{\partial L}{\partial \mu_{ij}} = m(\mu_{ij})^{m-1} D(x_i; c_j) + \lambda_i = 0 \quad (15)$$

Assumindo-se que nenhum $x_i = c_j$ então $D(x_i; c_j) > 0$ e

$$\mu_{ij} = \left[\frac{-\lambda_i}{m D(x_i; c_j)} \right]^{\frac{1}{m-1}} \quad (16)$$

Somando para $j = 1, 2, \dots, K$ e usando $\sum_{i=1}^K \mu_{ij} = 1$,

$$\sum_{j=1}^K \left[\frac{-\lambda_i}{mD(x_i, c_j)} \right]^{\frac{1}{m-1}} = 1 \quad (17)$$

Substituindo para λ_i ,

$$\mu_{ij} = \left[\sum_{l=1}^K \left(\frac{D(x_i; c_j)}{D(x_i; c_l)} \right)^{\frac{1}{m-1}} \right]^{-1} \quad (18)$$

A seguir, será efetuada a otimização de J com relação a c_j

$$\frac{\partial J}{\partial c_j} = 0 \quad (19)$$

Considerando a distância Euclidiana $D(x_i; c_j) = (x_i - c_j)^2$

$$\frac{\partial J}{\partial c_j} = -\sum_{i=1}^N (\mu_{ij})^m x_i + \sum_{i=1}^N (\mu_{ij})^m c_j = 0 \quad (20)$$

Portanto,

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^N (\mu_{ij})^m x_i}{\sum_{i=1}^N (\mu_{ij})^m} \quad (21)$$

A entrada do algoritmo FCM são os N elementos do conjunto de dados, o número de clusters K ($1 < K < N$), o valor de m e a condição de parada. Os passos do algoritmo são os seguintes:

1. Inicialize os valores dos centros dos clusters c_j com números aleatórios no intervalo de dados;
2. Inicializar o passo $r = 0$;
3. Calcule os valores de μ_{ij} usando a Eq.(22):

$$\mu_{ij} = \frac{1}{\sum_{l=1}^K \left(\frac{D(x_i; c_j)}{D(x_i; c_l)} \right)^{\frac{1}{m-1}}} \quad (22)$$

4. Calcule o valor inicial de $J(0)$ usando a Eq.(23):

$$J = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K (\mu_{ij})^m D(x_i; c_j) \quad (23)$$

5. Calcule o centro do cluster j pela Eq.(24):

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_{ij}^m x_i}{\sum_{i=1}^N \mu_{ij}^m} \quad (24)$$

6. Incremente r em 1;
7. Calcule μ_{ij} usando a Eq.(22);
8. Calcule $J(r)$ usando a Eq.(23).
9. Se $\|J^r - J^{r-1}\| \leq \varepsilon$ pare. Se não, retorne ao passo 5.

O critério de convergência é o limiar $\varepsilon > 0$ ou um número de iterações pré-fixado.

3.3.1. Testes de Validação

Após a aplicação do algoritmo FCM, é necessário um teste de validação para verificar se o número de clusters gerado foi de fato a melhor maneira de se particionar os dados. Para isto, são aplicados testes de validação com base em medidas objetivas. A vantagem dos testes de validação dos clusters é prover o número ótimo de clusters (K) a ser utilizado. Este valor pode ser comparado ao número de *clusters* gerado inicialmente pelo algoritmo FCM e se avaliar as possíveis divergências. Diversas medidas são propostas na literatura [67];[31], dentre as quais a *Partition Coefficient* (PC) e a *Partition Entropy* (PE), brevemente descritas a seguir.

(1) A PC é definida por:

$$PC(K) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K (\mu_{ij})^2 \quad (25)$$

onde: $\frac{1}{K} \leq PC(K) \leq 1$. O número ótimo de K é obtido encontrando-se o $\max_{2 \leq K \leq N-1} PC(K)$.

(2) A PE é definida por:

$$PE(K) = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \mu_{ij} \log_2 \mu_{ij} \quad (26)$$

onde: $0 \leq PE(K) \leq \log_2 K$. O número ótimo de K é obtido encontrando-se o $\min_{2 \leq K \leq N-1} PC(K)$.

3.4. Algoritmo CBR

O algoritmo CBR consiste basicamente em cinco passos:

- 1) Armazenar os resultados de simulações ou de medidas em laboratório relativos às entradas e respectivas saídas do sistema a ser controlado;
- 2) Quando uma nova situação ocorre, o CBR busca e recupera da base de dados armazenados o caso mais próximo ao da situação atual;
- 3) Reutiliza a solução proposta no caso passado para o caso atual;
- 4) Analisa se a solução proposta foi adequada; e
- 5) Atualiza a base de dados com este novo caso. A partir daí este caso poderá ser utilizado para resolver problemas futuros.

No passo 2, a distância Euclidiana é empregada para determinar qual o caso ocorrido no passado que é mais próximo (similar) ao caso atual.

Como exemplo, considerando um sistema com uma base de dados com N casos armazenados, sendo que cada caso possui dois parâmetros de entrada: B_{1j} e B_{2j} , $j=1 \dots N$. Os casos novos que surgem ao longo do tempo também possuem dois parâmetros de entrada A_{i1} e A_{i2} , onde i é o índice de entrada. A distância Euclidiana entre os parâmetros de entrada armazenados e os novos é dada por:

$$d_{ij} = \sqrt{(A_{i1} - B_{j1})^2 + (A_{i2} - B_{j2})^2} \quad (27)$$

Após determinar todas as distâncias Euclidianas (d_{ij}), a menor dentre elas será escolhida para determinar o caso armazenado mais próximo do atual. Então, a solução (saída) encontrada naquele caso será utilizada no caso presente. No presente trabalho não são empregadas técnicas adicionais de aprendizado-esquecimento no CBR.

Capítulo 4

Conceito de Rede Óptica Cognitiva e Estudo de Caso

Neste Capítulo será apresentado um conceito de rede óptica cognitiva e um estudo de caso de aplicação do algoritmo de agrupamento FCM para determinar, em tempo real, o formato de modulação de *transponders* flexíveis de acordo com a qualidade da transmissão dos canais ópticos. Este estudo engloba as etapas de aprendizado, a partir de dados coletados por monitores de rede, e de tomada de decisão.

4.1. Conceito de Rede Óptica Cognitiva

Com base nos novos paradigmas de evolução das redes ópticas discutidos no Capítulo 1 e no levantamento do estado da arte em conceitos e arquiteturas de redes cognitivas, discutido no Capítulo 2, conclui-se que uma rede óptica cognitiva deve ser baseada numa infraestrutura de rede definida por software, onde o plano de encaminhamento de dados é separado do plano de controle por uma interface padronizada e onde o plano de controle inclui as seguintes funcionalidades:

1. Cálculo dos caminhos ópticos entre os nós de origem e destino considerando a topologia da rede;
2. Escolha dos atributos dos caminhos ópticos, tais como: taxa de transmissão, formato de modulação, FEC, comprimento de onda e grade espectral, entre outros, considerando:
 - i. A qualidade de transmissão (QoT);
 - ii. A disponibilidade de espectro;

- iii. Os requisitos dos serviços de rede solicitados (QoS);
 - iv. Os requisitos de economia de energia;
 - v. As políticas dadas pelos operadores da rede e
 - vi. O aprendizado adquirido a partir de eventos ocorridos no passado e da interação com o meio óptico.
3. Configuração dos atributos selecionados no item 2, de forma remota e autônoma (auto-configuração), nos *transponders* e ROADMs;
 4. Reconfiguração remota e autônoma dos atributos dos caminhos ópticos (auto-otimização) considerando a QoT medida em tempo real e o aprendizado adquirido de eventos passados.
 5. Recuperação autônoma de falhas (auto-cura) considerando o aprendizado adquirido de eventos passados;
 6. Cooperação entre os diversos elementos de rede e entre diferentes domínios de rede.

Assim, o seguinte conceito de rede óptica cognitiva é proposto: *sistema de comunicação óptica programável por software, inteligente, ciente da QoT do meio óptico, da disponibilidade de espectro, dos requisitos dos serviços, dos requisitos de economia de energia, que segue políticas dadas pelos operadores da rede e que utiliza uma metodologia de aprendizado para aprender com o casos ocorridos no passado e adaptar seus estados internos (configurações) em função das mudanças no meio óptico, através do ajuste, em tempo real e de forma autônoma, dos parâmetros de operação (por exemplo, taxa de transmissão, formato de modulação, comprimento de onda, grade espectral, etc.) visando atingir uma comunicação de alta qualidade e de alta disponibilidade e a utilização eficiente do espectro óptico.*

Diversas funcionalidades embutidas neste conceito serão utilizadas no estudo de caso discutido a seguir.

4.2. Estudo de Caso

Para manter um bom funcionamento da rede óptica, o algoritmo FCM é adaptado para determinar o formato de modulação que será empregado em conexões de rede à 200 Gbit/s durante a fase de estabelecimento das mesmas. Os formatos de modulação selecionados para esta aplicação são o DP-QPSK à taxa de 100 Gbit/s e o DP-16 QAM à taxa de 200 Gbit/s. Caso não seja possível estabelecer um lightpath com a QoT desejada utilizando o formato de modulação DP-16QAM, o FCM muda o formato para DP-QPSK. No entanto, apesar da taxa de transmissão ser inferior a 200 Gbit/s no formato DP-QPSK, a solicitação será plenamente atendida através do aumento do número de subportadoras ópticas, com o uso do esquema de modulação OFDM. No caso de uma solicitação de 200 Gbit/s ser atendida com DP-16QAM, é utilizada uma única subportadora óptica ocupando um slot de frequência de 25 GHz. No caso da solicitação de 200 Gbit/s ser atendida com DP-QPSK, duas subportadoras ópticas são utilizadas em paralelo, cada uma à taxa de 100 Gbit/s, ocupando dois slots de 25 GHz, totalizando 50 GHz.

4.2.1. Etapas do Algoritmo FCM

A abordagem adotada para implementar o algoritmo FCM é dividida em seis etapas:

1. Coleta de Informações do Sistema Óptico

Coleta de informações do sistema de transmissão óptico através de simulações computacionais utilizando o *software* Optisystem versão 13.0. O objetivo desta etapa é computar o desempenho de cada caminho óptico em termos de uma determinada métrica (como BER, OSNR, fator Q) considerando os efeitos degradantes da camada física para cada um dos formatos de modulação selecionados e para diferentes comprimentos de rota. Ao final desta etapa, dispõe-se de uma base de dados com as características dos caminhos ópticos simulados para todos os possíveis comprimentos de rota.

2. Pré-Processamento das Informações

Pré-processamento dos dados obtidos na etapa 1 para determinar a estrutura de dados adequada e os parâmetros relevantes do sistema a serem escolhidos como entradas e saídas do algoritmo FCM.

3. Escolha do número de clusters

Escolha do número de clusters adequado ao problema em questão.

4. Agrupamento dos dados

Nesta etapa, os dados são agrupados através do algoritmo FCM, sendo geradas as funções de pertinência. Esta etapa é simulada no *software* Matlab em segundos.

5. Geração de Regras

A partir das funções de pertinência, são geradas as regras fuzzy para tomada de decisão em tempo real. Esta etapa também é simulada no *software* Matlab, sendo gerado um código executável no formato .FIS.

6. Aplicação do FCM

Para cada solicitação de estabelecimento de conexão que chega ao plano de controle, o algoritmo FCM determina o formato de modulação adequado em função do comprimento da rota. Para isto, foi desenvolvido um simulador de rede no *software* Matlab que calcula a rota mais apropriada para estabelecer a conexão solicitada e emprega um código executável, contendo as regras obtidas na etapa 5, para a escolha do formato de modulação. Em função da rapidez de processamento, é possível utilizar o FCM para tomar esta decisão em tempo real. A seguir, estas etapas serão detalhadas, bem como os resultados obtidos.

4.3. Simulações dos Enlaces Ópticos para Coleta de Dados

O arranjo da simulação dos enlaces ópticos no Optisystem é apresentado na Figura 44.

Figura 44 – Arranjo da Simulação no Optisystem.

Este arranjo é composto pelos seguintes blocos funcionais: transmissor óptico DP-QPSK ou DP-16QAM, amplificadores ópticos, fibra óptica, controlador de loop, filtro óptico, receptor óptico coerente, amplificadores elétricos, módulo de processamento digital de sinais (DSP), medidor de OSNR e medidor e visualizador de fator Q.

A configuração destes componentes para DP-QPSK e DP-16 QAM é listada na Tabela 4 e Tabela 5, respectivamente.

Tabela 4– Dados de Configuração da Simulação DP-QPSK.

Componente	Parâmetro	Valor
Transmissor Óptico DP-QPSK	Taxa de Transmissão	100 Gbit/s
	Taxa de Símbolos	25 Gbaud
	Frequência	193,1 THz
	Potência	0 dBm
	Largura de Linha	0,01 MHz
	Figura de Ruído	4dB
Fibra óptica	Comprimento	50 Km
	Atenuação	0,2 dB/km
	Dispersão	16,75 ps/nm/km

	PMD	$0,05 \text{ os} / \sqrt{(km)}$
Amplificador Óptico	Ganho	10 dB
	Figura de Ruído	4 dB
Filtro Óptico	Tipo	Gaussiano
	Frequência	193,1 THz
	Largura de banda	50 GHz
Receptor Óptico Coerente	Frequência	193,1 THz
	Potência	0 dBm
	Largura de linha	0,01 MHz
	Responsividade	1 A/W
	Corrente de Escuro	10 nA
Amplificador Elétrico	Ganho	15 dB
	Potência de Ruído	-100 dBm
DSP	Tipo de Polarização	Dupla
	Tipo de Modulação	QPSK
	Taxa de Símbolos	Taxa de Transmissão/8
	Frequência	193,1 THz
	Ordem de Potência	4
	Ordem de Potência dos	4
	símbolos	
	Amostras por bloco	2048
	Tamanho da janela	512

Tabela 5– Dados de Configuração da Simulação DP-16 QAM.

Componente	Parâmetro	Valor
Transmissor Óptico DP-16QAM	Taxa de Bits	200 Gbit/s
	Taxa de Símbolos	25 Gbaud
	Frequência	193,1 THz
	Potência	0 dBm
	Largura de Linha	0,01 MHz

Fibra óptica	Figura de Ruído	4dB
	Comprimento	50 Km
	Atenuação	0,2 dB/km
	Dispersão	16,75 ps/nm/km
	PMD	0,05 os / $\sqrt{(km)}$
Amplificador Óptico	Ganho	10 dB
	Figura de Ruído	4 dB
Filtro Óptico	Tipo	Gaussiano
	Frequência	193,1 THz
	Largura de banda	50 GHz
Receptor Óptico Coerente	Frequência	193,1 THz
	Potência	0 dBm
	Largura de linha	0,01 MHz
	Responsividade	1 A/W
	Corrente de Escuro	10 nA
Amplificador Elétrico	Ganho	15 dB
	Potência de Ruído	-100 dBm
DSP	Tipo de Polarização	Dupla
	Tipo de Modulação	16QAM
	Taxa de Símbolos	Taxa de Transmissão/8
	Frequência	193,1 THz
	Ordem de Potência	4
	Ordem de Potência dos símbolos	4
	Amostras por bloco	2048
	Tamanho da janela	512

No receptor óptico coerente, todas as características do sinal óptico (amplitude, polarização, frequência e fase) são convertidas para o domínio elétrico. No entanto, a fase do laser de recepção não é a mesma do laser de transmissão, sendo necessário o uso de algoritmos de processamento digital de sinais (DSP) para recuperá-la. Estes algoritmos também são utilizados para compensação dos efeitos degradantes da camada física. A Figura 45 ilustra a sequência de funcionalidades do DSP [69]. As

funções de ortogonalização e alinhamento são utilizadas para compensar as diferenças de potência em fase e quadratura. A compensação de CD é para compensar a dispersão cromática. A recuperação de relógio é para recuperar o período do símbolo. O bloco demultiplexação de polarização tem a finalidade de separar as componentes de polarização e equalizar variações no canal. Logo após, no estimador de frequência, estima-se o desvio de frequência entre o sinal e o oscilador local. O mesmo é feito em relação à fase, no estimador de fase. A implementação destes blocos pode ser feita de diversas maneiras, sendo escolha de cada grupo de pesquisa.

Figura 45 – Algoritmos de Processamento Digital de Sinais.

A partir desta simulação, foram obtidas informações relativas ao comprimento da rota e respectivos fator Q e OSNR para 100 Gbit/s DP-QPSK e 200 Gbit/s DP-16 QAM, como mostra a Tabela 6. Foram simuladas rotas com comprimento variando de 50km a 5000km, em passos de 50km ajustados no número de voltas do controlador de *loop* da Figura 44. O fator Q está relacionado ao BER [70] por:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (28)$$

O valor de $BER = 10^{-3}$ é escolhido considerando o emprego de correção de erro (FEC). Então, o fator Q correspondente a esta BER tem valor 3. Então, as rotas com $Q \geq 3$ são consideradas com QoT adequada.

Os valores de OSNR obtidos nas simulações do Optisystem para $BER = 10^{-3}$ estão próximos aos limites teóricos definidos em [71], onde a OSNR é relacionada à SNR_b pela Eq.(29):

$$OSNR = \frac{R_b}{2B_{ref}} SNR_b \quad (29)$$

R_b = Taxa de bits

B_{ref} = 12,5 GHz, que corresponde à resolução de 0,1 nm do analisador de espectro óptico

SNR_b = Relação Sinal/Ruído por bit = $\frac{E_b}{N_0}$, onde E_b = Energia por bit e N_0 = ruído

A SNR_b para diferentes formatos de modulação pode ser obtida através da função *BERTool* do software Matlab. A Figura 46 mostra os valores da SNR_b versus BER para QPSK e 16QAM, obtidos através do BERTool do Matlab.

A Eq.(29) em decibéis (dB) é dada por:

$$OSNR(dB) = 10 \log \frac{R_b}{2B_{ef}} + SNR_b(dB) \quad (30)$$

Os valores teóricos da OSNR para $BER = 10^{-3}$ obtidos a partir da Eq. (30), para 100 Gbit/s DP-QPSK e 200 Gbit/s DP-16QAM são: 12,82dB e 18,55dB, respectivamente. O valor limite obtido na simulação Optisystem para o DP-16QAM 200 Gbits/s foi 20,59 dB e para DP-QPSK o valor limite não foi atingido, uma vez que para 5.000 km, a OSNR obtida foi 19,20 dB.

Figura 46 – SNR_b versus BER.

4.4. Pré-Processamento das Informações

A Tabela 6 foi analisada e somente os caminhos ópticos com $Q \geq 3$ foram considerados, sendo gerada a Tabela 7, que inclui os comprimentos das rotas e os formatos de modulação adequados para cada rota, ou seja, o formato de modulação que mantém a QoT aceitável. Na Tabela 7, o número 1 indica o formato de modulação DP-QPSK 100 Gbits/s e o número 2 indica o formato de modulação DP-16QAM 200 Gbits/s. Esta tabela será utilizada na etapa seguinte para o treinamento e aprendizado do FCM.

Tabela 6– Dados Obtidos na Simulação dos Enlaces.

Loops	Rótulo 100Gbit/s DP-QPSK	Rota (km)	OSNR	Fator Q	Rótulo 200Gbit/s DP-16QAM	Rota (km)	OSNR	Fator Q
1	1	50	29,17	24,32	2	50	32,06	8,24
2	1	100	28,76	22,92	2	100	29,47	7,03
3	1	150	28,41	21,55	2	150	27,85	6,25
4	1	200	28,10	20,39	2	200	26,69	5,67
5	1	250	27,81	19,70	2	250	27,76	5,19
6	1	300	27,52	18,83	2	300	25,01	4,82
7	1	350	27,26	19,23	2	350	24,37	4,50
8	1	400	27,01	17,09	2	400	23,79	4,26
9	1	450	26,78	16,89	2	450	23,05	4,05
10	1	500	26,56	16,25	2	500	22,86	3,87
11	1	550	26,35	15,59	2	550	22,48	3,71
12	1	600	26,16	15,32	2	600	22,11	3,55
13	1	650	25,98	15,02	2	650	21,76	3,45
14	1	700	25,80	15,14	2	700	21,43	3,33
15	1	750	25,62	13,90	2	750	21,13	3,23
16	1	800	25,45	13,71	2	800	20,85	3,10
17	1	850	25,29	13,51	2	850	20,59	3,02
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
99	1	4950	19,24	5,63	2	4950	12,94	1,63
100	1	5000	19,20	5,54	2	5000	12,90	1,62

Tabela 7– Dados Processados.

Rota (km)	Formato de Modulação	OSNR
50	2	32,06
100	2	29,47
150	2	27,85
200	2	26,69
250	2	27,76
300	2	25,01
350	2	24,37
400	2	23,79
450	2	23,05
500	2	22,86
550	2	22,48
600	2	22,11
650	2	21,76
700	2	21,43
750	2	21,13
800	2	20,85
850	2	20,59
900	1	25,12
⋮	⋮	⋮
4950	1	19,24
5000	1	19,2

4.5. Agrupamento dos dados

Para agrupar os dados da Tabela 7 no algoritmo FCM, é utilizada a função *fcm* do Matlab. Esta função requer conjuntos separados de dados de entrada e de saída, sendo que ambos devem estar relacionados a um mesmo parâmetro. Por exemplo, neste estudo de caso, os dados de entrada e os dados de saída estão listados na Tabela 8 e Tabela 9 e o parâmetro comum à entrada e à saída do FCM, X_{in} e X_{out} é a OSNR.

Tabela 8– Dados de Entrada FCM.

Entrada X_{in}	
Rota (km)	OSNR
50	32,06
100	29,47
150	27,85
200	26,69
250	27,76
300	25,01
350	24,37
400	23,79
450	23,05
500	22,86
550	22,48
600	22,11
650	21,76
700	21,43
750	21,13
800	20,85
850	20,59
900	25,12
950	24,97
1000	24,82
⋮	⋮
4500	19,62
4550	19,57
4600	19,54
4650	19,49
4700	19,45
4750	19,41
4800	19,36
4850	19,32
4900	19,28
4950	19,24
5000	19,2

Tabela 9– Dados de Saída FCM.

Saída - X_{out}	
Formato de Modulação	OSNR
2	32,06
2	29,47
2	27,85
2	26,69
2	27,76
2	25,01
2	24,37
2	23,79
2	23,05
2	22,86
2	22,48
2	22,11
2	21,76
2	21,43
2	21,13
2	20,85
2	20,59
1	25,12
1	19,62
⋮	⋮
1	19,57
1	19,54
1	19,49
1	19,45
1	19,41
1	19,36
1	19,32
1	19,28
1	19,24
1	19,2

A função *fcm* do Matlab é utilizada para modelar o algoritmo FCM e determinar as funções de pertinência e o número de regras para o conjunto de entradas e saídas. Esta função tem como entradas os valores de *Xin*, *Xout*, *tipo* e *cluster n*. Neste estudo de caso, foi escolhido o número de clusters igual a dois ($n = 2$). O cluster 1 está relacionado a comprimentos de caminhos ópticos curtos (iguais ou inferiores a 850 km) enquanto o cluster 2 está relacionado a rotas de longas distâncias (superiores a 850 km). O tipo refere-se a “Mandani ou Sugeno”. O Mandani é definido por regras do tipo “Se A então B” cujos antecedentes (“Se A”) e consequentes (“então B”) são conjuntos *fuzzy*. Já no Sugeno, somente os antecedentes das regras são formados por variáveis *fuzzy*, sendo os consequentes expressos por uma função linear dos valores variáveis de entrada [68]. Neste estudo de caso, o tipo Mandani foi escolhido por utilizarmos somente conjuntos *fuzzy*.

Como resultado da função *fcm*, um arquivo denominado FISMAT é gerado na área de trabalho do Matlab. Este arquivo contém as funções de pertinência e a estrutura das regras geradas pelo FCM.

4.6. Geração das Regras

Uma vez gerado o arquivo FISMAT, utiliza-se o *Fuzzy Tool Box* do Matlab para importá-lo da área de trabalho. Com este Tool Box é possível obter uma visualização gráfica das funções de pertinência e também das regras geradas, como ilustra a Figura 47.

As funções de pertinência são gaussianas. Este tipo de função é interessante, pois fornece uma transição suave entre os dois clusters, provendo flexibilidade ao sistema.

As regras definidas são:

1. Se (comprimento da rota pertence ao cluster 1) então (formato de modulação pertence ao cluster 1 – Tipo 1);
2. Se (comprimento da rota pertence ao cluster 2) então (formato de modulação pertence ao cluster 2 – Tipo 2).

O *Fuzzy Tool Box* tem uma funcionalidade de exportação de um arquivo executável com extensão .FIS a ser utilizado no programa para executar as regras determinadas pelo algoritmo FCM.

O plano de controle usa essas regras para definir, em tempo real, o formato de modulação adequada para cada solicitação de *lightpath*. Além disso, estas regras bem como as funções de pertinência podem ser atualizadas em tempo real, considerando cada novo caso como um novo dado de treinamento. Para isto, o algoritmo FCM precisa trabalhar em conjunto com um sistema de

monitoramento de rede óptica que meça o fator Q dos *lightpaths* estabelecidos. Nesta etapa será considerada apenas a operação do algoritmo em tempo real, sendo seu treinamento realizado “off-line”.

A utilização das funções de pertinência do FCM ao invés de limiares fixos de valores de comprimento da rota para decisão quanto ao formato de modulação é necessária para lidar com regiões de incerteza de QoT, criadas por degradações da camada física a partir de sinais co-propagantes no caminho óptico, como mostradas na Figura 36.

Figura 47 – Funções de Pertinência de Entrada e Saída do FCM.

Caso novos formatos de modulação tenham que ser adicionados ao sistema, um novo número de clusters tem que ser gerado, bem como novas regras.

4.7. Aplicação do Algoritmo FCM

A etapa de aplicação compreende a definição da rede, a geração do tráfego e o uso das regras FCM.

A rede simulada segue uma arquitetura transparente, ou seja, não acontece conversão eletro-óptica nos nós intermediários do caminho óptico. No simulador, a rede é representada por uma matriz de pesos, cujo valor a_{ij} indica as distâncias entre os nós i e j , como mostra a Figura 48. Caso não exista um enlace entre dois nós, adota-se o valor Inf (∞).

Figura 48 – Topologia da rede e sua representação, Matriz *transmat*.

O simulador de rede desenvolvido também inclui uma matriz de capacidade dos enlaces da rede, com a máxima banda entre dois nós. Neste estudo de caso, a banda de cada enlace foi definida como 200 Tbit/s. A utilização de enlaces com tão grande capacidade tem a finalidade de minimizar a probabilidade de bloqueio de conexões, uma vez que o objetivo desta simulação é testar a rapidez e precisão do algoritmo FCM.

Definida a rede, são geradas as solicitações de estabelecimento de conexão, através de um gerador de tráfego no Matlab. A modelagem do tráfego é realizada por meio de uma distribuição de

Poisson onde as chamadas são independentes e a geração das solicitações é exponencialmente distribuída, como mostra a Eq.(31):

$$t_g = \frac{-\log_{10}(1-w)}{\lambda} \quad (31)$$

onde w é uma variável aleatória com valores entre 0 e 1, enquanto λ representa a taxa de chegada das conexões e é definida pela Eq.(32):

$$\lambda = E \cdot \mu \quad (32)$$

E é a carga em erlangs e μ é a taxa de serviço. O tempo de cada conexão (c_d) é dado por:

$$c_d = \frac{-\log_{10}(1-f)}{\mu} \quad (33)$$

onde f é uma variável aleatória entre 0 e 1.

Os eventos de alocação são ordenados por seu tempo de início e o evento de desalocação ocorre após o tempo de duração c_d de cada conexão, como mostra a Figura 49.

Figura 49 – Eventos de Alocação e Liberação de Conexões.

Neste estudo de caso, todas as solicitações de conexões são de 200 Gbit/s, que podem ser atendidas com DP-16QAM ou DP-QPSK. À medida que as conexões são alocadas nos enlaces, a

capacidade dos mesmos vai sendo reduzida de 200 Gbit/s para cada conexão alocada. Por outro lado, à medida que as conexões são terminadas, a banda vai sendo restituída ao enlace.

Quando uma solicitação de estabelecimento de conexão chega ao plano de controle, utiliza-se o algoritmo de roteamento *Dijkstra* para encontrar o caminho mais curto entre um par de nós origem-destino. Definido o caminho, utiliza-se o comprimento deste caminho, aqui denominado r , como entrada para o algoritmo FCM e utiliza-se as regras FCM para determinar o formato de modulação mais adequado para este caminho. A Figura 50 apresenta os passos de execução descritos acima quando um número D de pedidos de estabelecimento de conexão ocorrem.

Passos do Algoritmo FCM
1: Para $j=1$ até o número de pedido de conexões (D)
Quando um pedido de conexão chega:
2: Roda algoritmo Dijkstra's para calcular o comprimento do caminho óptico mais curto (r) entre os nós de origem e destino
3: Se nenhum caminho for encontrado então
4: Bloqueia o pedido de conexão.
5: caso contrário
Algoritmo FCM
6: Entrada FCM $\leq r$
7: Seleciona o formato de modulação usando as regras FCM definidas no item 4.6.
8: Fim

Figura 50 – Pseudocódigo do FCM.

4.8. Considerações Finais

A utilização do algoritmo FCM em redes ópticas de próxima geração é uma abordagem nova, que provê rapidez e precisão ao plano de controle para tomada de decisão em tempo real. Os resultados numéricos deste estudo de caso são apresentados no Capítulo 5, bem como uma comparação de desempenho do FCM com o algoritmo CBR.

Capítulo 5

Resultados Numéricos e Comparação de Desempenho entre os Algoritmos FCM e CBR

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados das simulações computacionais descritas anteriormente. São também apresentadas: (1) uma comparação de desempenho entre os algoritmos FCM e CBR em termos de complexidade temporal e precisão para tomada de decisão sobre o formato de modulação diante de um pedido de conexão e (2) uma arquitetura para o plano de controle das NG-ONs empregando o algoritmo FCM. O modo de operação do FCM segue os passos descritos na Figura 50. Já o modo de operação do CBR segue os passos descritos a seguir.

5.1. Passos do Algoritmo CBR

Na etapa de treinamento do CBR são utilizados os mesmos dados usados no treinamento do FCM (Tabela 7). No CBR, esta tabela é armazenada e utilizada como memória de casos de uso que ocorreram no passado. Então, quando uma nova solicitação de estabelecimento de conexão chega ao plano de controle, o algoritmo de roteamento *Dijkstra* é usado para calcular o comprimento do caminho óptico mais curto entre os nós de origem e de destino. Em seguida, o CBR consulta a Tabela 7 para buscar o comprimento do caminho mais próximo ao calculado pelo algoritmo de roteamento *Dijkstra*. Para isto, é usada como métrica a distância Euclidiana, de acordo com a Eq.(27). Então, a solução encontrada neste caso armazenado é utilizada como solução para o caso novo. Os passos descritos acima são mostrados na forma de um pseudocódigo na Figura 51, logo abaixo do pseudocódigo do FCM, uma vez que estes dois algoritmos são executados de forma sequencial, para cada pedido de conexão, para que seus resultados possam ser comparados de forma igualitária .

1: **Para j=1 até D números de conexões**

Quando um pedido de conexão chega:

2: Roda algoritmo Dijkstra's para calcular o comprimento do caminho óptico (r) mais curto entre os nós de origem e destino

3: **Se nenhum caminho for encontrado então**

4: Bloqueia o pedido de conexão.

5: **caso contrário**

Algoritmo FCM

6: Inicia o contador de tempo de execução (t_1).

7: Entrada FCM $\leq r$

8: Seleciona o formato de modulação usando as regras FCM definidas no item 4.5

9: Para o contador de tempo de execução (t_1)

Algoritmo CBR

10: Inicia o contador de tempo de execução (t_2).

11: $A_{11} \leq r$

12: **função distância Euclidiana**

13: **para j=1 até N**

14: calcula d_{ij} por meio da Eq.(27).

15: **fim**

16: **fim da função.**

17: Encontra o caso armazenado com a mínima d_{ij}

18: Recupera o formato de modulação do caso armazenado

19: Para o contador de tempo de execução (t_2).

20: **Fim**

Figura 51– Pseudocódigos do FCM e CBR.

Na Figura 51, quando uma solicitação de estabelecimento de conexão chega ao plano de controle, utiliza-se o algoritmo de roteamento *Dijkstra* para encontrar o caminho mais curto entre um par de nós origem-destino. Definido o caminho, utiliza-se o comprimento deste caminho, aqui denominado r , como entrada para os algoritmos FCM e CBR. As regras FCM são utilizadas para determinar o formato de modulação mais adequado para este caminho e a distância Euclidiana é utilizada para encontrar o caso armazenado mais próximo ao da situação atual. Dois contadores de tempo t_1 e t_2 são utilizados para calcular o tempo de execução dos algoritmos FCM e CBR, respectivamente.

5.2. Análise da Complexidade Temporal do CBR e FCM

A análise da complexidade temporal dos algoritmos FCM e CBR é efetuada a seguir usando a Notação O (*Big O*). A complexidade temporal mede o tempo, dada uma entrada de dados, que o algoritmo requer para produzir uma resposta. Na Notação O, é definida uma função que relaciona o tamanho da entrada (N) com o tempo de execução: $t = f(N)$.

As principais classes de complexidade definidas no big O são: *Constante*: $O(1)$, *Linear*: $O(N)$, *Logarítmica*: $O(\log N)$ e *Quadrática*: $O(N^2)$.

Para a análise da complexidade temporal (CT) será considerada a análise de CT de cada um dos passos do pseudocódigo da Figura 51 e os seguintes parâmetros:

D = Número de pedidos de conexão;

P = Número de nós da topologia da rede;

N = Número de casos armazenados na base de dados do CBR.

A seguir, é efetuada a soma das CT dos passos dos algoritmos FCM e CBR, conforme descrito abaixo:

- ✓ No passo 1 do pseudocódigo, tem-se um laço (*loop*) de D passos. Neste caso, a complexidade temporal é linear e é dada por $O(D)$. Este passo é comum ao FCM e CBR.
- ✓ No passo 2, a CT é a do algoritmo de *Dijkstra* é quadrática e dada por $O(P^2)$ [72]. Este algoritmo ou uma variante dele estará sempre presente nas redes, pois tem a finalidade de procurar o caminho mais curto ou de recursos mínimos. Portanto, será comum ao FCM e ao CBR.
- ✓ No passo 6, a CT para o cálculo da distância Euclidiana do algoritmo CBR é linear e é dada por $O(N)$ [73].
- ✓ Já o algoritmo FCM não depende do número de casos armazenados (N), pois as informações de treinamento são embutidas nas regras. Então, a CT deste passo no FCM é dada por $O(1)$.

Assim, a complexidade temporal total do algoritmo CBR é dada por: $O(D + P^2 + N)$ e a do FCM é dada por $O(D + P^2 + 1)$.

A diferença de CT entre o FCM e o CBR depende diretamente do número de casos armazenados na base de dados do CBR. A seguir, são mostrados os resultados das simulações computacionais que corroboram esta análise. Estas simulações foram feitas em Matlab num computador com um processador Intel Core i7, 1,8 GHz e 16 GB de RAM.

5.3. Resultados das Simulações

Para análise do tempo de execução dos algoritmos, foi implementado em Matlab um gerador de tráfego conforme descrito no item 4.7. Este gerador foi usado para criar de 500 a 5.000 pedidos de estabelecimento de conexões de 200 Gbits/s. Dependendo da qualidade da transmissão de cada caminho óptico, os pedidos são aceitos usando DP-16QAM com uma subportadora óptica ou DP-QPSK com duas subportadoras ópticas. A Figura 52 mostra o resultado dos tempos de execução dos algoritmos FCM e CBR, considerando-se no CBR 100 casos armazenados ($N = 100$), de acordo com a Tabela 7.

Figura 52– Tempos de Execução do FCM e CBR para $N=100$.

Na Figura 52, cada ponto do gráfico corresponde aos valores médios obtidos de 10 execuções de cada algoritmo. O desvio-padrão não aparece devido à escala do gráfico. Como exemplo, o valor médio do tempo de execução do algoritmo FCM para 2.500 pedidos de conexão é 14,362 segundos, o desvio padrão é 0,2436 e os limites inferior e superior do intervalo de confiança de 95% da média são 14,187 e 14,536. Para o algoritmo CBR, o valor médio do tempo de execução é 1405,590 segundos, o

desvio padrão é 33,0615 e os limites inferior e superior do intervalo de confiança de 95% da média são 1381,9392 e 1429,2408, para o mesmo número de pedidos de conexão.

Estes resultados são bastante promissores e mostram que o algoritmo FCM é cerca de duas ordens de grandeza mais rápido que o CBR quando $N = 100$, como mostra a Tabela 10.

Tabela 10– Relação entre os Tempos de Execução CBR e FCM em função de D .

Número de Pedidos de Conexão (D)	$\frac{Tempo_{CBR}}{Tempo_{Fuzzy}}$
500	84,1
1.000	89,3
1.500	91,4
2.000	93,2
2.500	97,3
3.000	90,7
3.500	96,6
4.000	99,6
4.500	96,1
5.000	100,2
50.000	97,9
100.000	97,9

Nesta simulação, os dois algoritmos fornecem 100% de acerto na seleção do formato de modulação. Por outro lado, se o número de casos for reduzido para 50, o FCM continua proporcionando 100% de acerto na seleção do formato de modulação enquanto o CBR apresenta uma percentagem de erro de 30% para 5.000 pedidos de conexão. Estes erros ocorrem devido à redução do número de casos da base de dados (granularidade baixa). Esta imprecisão foi avaliada utilizando uma sequência conhecida de pedidos de conexão e formato de modulação correspondente, aplicada a ambos os algoritmos.

Por outro lado, se fixarmos o número de pedidos de conexão em 500 e variarmos o número de casos armazenados (N) de 100 a 50.000, os tempos de execução dos algoritmos CBR, FCM e a relação entre os mesmos estão mostrados na Figura 53, Figura 54 e Figura 55 abaixo.

Figura 53 – Tempos de Execução do CBR em função de N.

Figura 54 – Tempos de Execução do FCM em função de N.

Figura 55 – Relação entre os Tempos de Execução CBR e Fuzzy em função de N .

Estes resultados estão de acordo com o previsto na análise de complexidade temporal usando a Notação O , descrita no item 0, a qual previa uma complexidade temporal linear para o algoritmo CBR em função de N e constante para o algoritmo FCM. Isto mostra que o FCM tem melhor complexidade temporal do que o CBR e que o número de casos armazenados influencia diretamente no desempenho do CBR.

Por fim, o tempo de execução médio para o algoritmo FCM selecionar o formato de modulação de apenas um caminho óptico é de 6,47 ms. Este tempo é viável para a operação em tempo real, uma vez que é da mesma ordem de grandeza do obtido na aplicação de estimativa de QoT em tempo real desenvolvida no projeto CHRON[48].

Assim, conclui-se que o uso do FCM provê rapidez e precisão ao plano de controle. Além disso, oferece vantagens adicionais, pois dispensa a utilização de técnicas de aprendizado-esquecimento para redução do tamanho da base de dados do CBR e evita o problema de atribuição de diferentes pesos a múltiplos atributos correlacionados, o que pode não ser suficiente para considerar a interdependência entre os mesmos. No FCM, esta interdependência entre os atributos fica embutida nas funções de pertinência e regras geradas.

5.4. Arquitetura do Plano de Controle das NG-ONs com o uso do FCM.

Em função dos resultados obtidos nas simulações, é proposta a utilização do algoritmo FCM no plano de controle das redes ópticas de próxima geração, conforme a arquitetura ilustrada na Figura 56.

Figura 56 – Plano de Controle NG-ONs.

Na Figura 56, as aplicações de rede estão contidas no controlador de rede (CR) remoto e se comunicam com os equipamentos de rede através de uma interface aberta. Esta interface provê uma comunicação bidirecional através do protocolo OF. Agentes OF são colocados nos topos dos equipamentos de rede para prover a interface de comunicação com o CR. Além desta interface, o CR possui também outra interface para receber os pedidos de conexão dos usuários da rede. Diversas aplicações de rede são previstas e são utilizadas separadamente em duas etapas: (1) antes do estabelecimento das conexões e (2) após o estabelecimento das conexões.

Na primeira etapa, são empregados: (1) o algoritmo de roteamento (*Dijkstra*) para o cálculo da rota mais curta entre os nós de origem e destino usando a topologia da rede, (2) o algoritmo de alocação de espectro e (3) o algoritmo FCM, operando de acordo com os passos descritos no

Capítulo 4. O FCM está embutido no módulo denominado AC_1 e é responsável por determinar o formato de modulação para a rota calculada pelo Dijkstra. Existe uma correlação direta entre o formato de modulação escolhido pelo FCM e o tamanho do espectro a ser alocado para cada conexão. Portanto, a saída do AC_1 é uma entrada para o algoritmo de alocação de espectro. O formato de modulação escolhido bem como a Taxa de Transmissão, a frequência central da portadora óptica e a largura do espectro são enviadas para os agentes OF, via interface OF, para configurar os equipamentos de rede envolvidos na conexão.

Na segunda etapa, monitores de desempenho da rede monitoram a OSNR das conexões estabelecidas em tempo real e enviam os valores medidos ao CR via interface OF. O CR, por sua vez, envia estas medidas ao AC_2 que também emprega um algoritmo do tipo FCM, só que neste caso, tem como entrada a OSNR medida (não o comprimento da rota) e como saída, o formato de modulação selecionado, como mostra a Figura 57.

Figura 57 – Funções de Pertinência de Entrada e Saída do AC_2 .

As regras definidas são:

3. Se (a OSNR medida pertence ao cluster 1) então (formato de modulação pertence ao cluster 1 – Tipo 1);
4. Se (a OSNR medida pertence ao cluster 2) então (formato de modulação pertence ao cluster 2 – Tipo 2);

Com isto, o formato de modulação pode ser alterado dinamicamente, em tempo real, em função do desempenho da rede óptica. No caso de haver uma mudança no formato de modulação da conexão, após o seu estabelecimento, a alocação de espectro também é alterada de acordo com o novo formato. O algoritmo de desfragmentação aqui é utilizado para minimizar eventuais lacunas formadas no espectro com o estabelecimento e liberação das conexões.

Dessa forma, a operação conjunta do FCM com os monitores de desempenho da rede, proporciona o surgimento de novos casos de uso da rede que podem ser realimentados para o treinamento do algoritmo FCM, gerando então novas funções de pertinência e regras, dinamicamente.

5.5.Considerações Finais

A utilização do algoritmo FCM no plano de controle das redes ópticas de próxima geração em conjunto com monitores de desempenho da rede provê um ambiente dinâmico e altamente adaptável às mudanças de desempenho da rede óptica, onde as regras são recalculadas em tempo real.

Capítulo 6

Conclusões

Neste trabalho foi proposto um conceito de rede óptica cognitiva com base nos conceitos de rádio cognitivo, rede cognitiva e arquiteturas de redes ópticas cognitivas. Este conceito inclui o aprendizado através do uso de técnicas de Inteligência Computacional.

Para o aprendizado e tomada de decisão nas redes ópticas cognitivas, foi proposto o algoritmo de agrupamento FCM, sendo que o mesmo está sendo aplicado pela primeira vez neste contexto. As principais propriedades do FCM são: o aprendizado, baseado na experiência adquirida através de casos ocorridos no passado, geração automática de regras, a partir destes casos de uso, e a mudança dinâmica das regras e funções de pertinência, quando novos casos de uso ocorrem no sistema. No FCM, durante a fase de operação, não é necessária a utilização de uma base de dados, pois as informações ficam embutidas nas regras geradas. Com isto, o algoritmo FCM torna-se muito rápido para tomada de decisão e também flexível para adaptar-se ao contexto da rede.

Uma comparação de desempenho entre os algoritmos FCM e CBR foi efetuada devido a dois fatores: (1) aos ganhos demonstrados no uso do FCM, em relação ao CBR, em rádios cognitivos e (2) aos ganhos demonstrados no uso do CBR para avaliação de QoT em redes ópticas, em relação ao Q-Tool, que não usa cognição, sendo o CBR duas ordens de grandeza mais rápido que o Q-Tool.

Para analisar o desempenho dos algoritmos FCM e CBR em redes ópticas, foram realizadas diversas simulações, incluindo: simulações da camada física da rede óptica, simulações do algoritmo de roteamento Dijkstra, de um gerador de tráfego, do próprio algoritmo FCM, do algoritmo CBR e de uma aplicação que determina, em tempo real, o formato de modulação adequado para cada caminho óptico, quando um pedido de conexão chega ao plano de controle.

Os resultados obtidos mostraram que o FCM provê rapidez e precisão ao plano de controle, podendo operar em tempo real, sendo duas ordens de grandeza mais rápido do que o algoritmo CBR e atingindo 100% de acerto na seleção do formato de modulação. Além disso, traz ainda vantagens adicionais, pois dispensa a utilização de técnicas de aprendizado-esquecimento para redução do

tamanho da base de dados do CBR e evita o problema de atribuição de diferentes pesos aos atributos, quando existem múltiplos atributos correlacionados.

Por fim, foi elaborada uma proposta de arquitetura para o plano de controle no contexto de redes ópticas definidas por software. Esta proposta inclui dois algoritmos baseados em FCM para operar em duas etapas: um, antes do estabelecimento das conexões e o outro, após o estabelecimento das conexões. Nesta arquitetura vislumbra-se a aplicação do FCM em conjunto com um sistema de monitoramento de rede, o que permitirá a adaptação das funções de pertinência e das regras a partir das medidas obtidas da rede em tempo real e a mudança dinâmica dos parâmetros dos equipamentos de rede de acordo com estas regras.

As redes ópticas cognitivas encontram-se atualmente em estágio embrionário. Assim, diversas funcionalidades já utilizadas atualmente em rádios cognitivos podem ser desenvolvidas para serem aplicadas também às redes ópticas, tais como a inclusão das funcionalidades auto-*, ações pró-ativas, distribuição de algumas propriedades cognitivas para os elementos de rede, através da inclusão de um agente autônomo em cada elemento de rede e a comunicação entre estes agentes para a tomada de decisão. Além disso, informações das outras camadas de rede também podem ser utilizadas para a tomada de decisão (arquitetura *cross-layer*).

6.1. Trabalhos Futuros

A partir do trabalho desenvolvido, quatro linhas de pesquisa podem ser seguidas:

6.1.1. Inclusão de novos parâmetros do sistema óptico no algoritmo FCM

Inclusão de novas taxas de bits e formatos de modulação no algoritmo FCM e utilização do algoritmo FCM para alocação dinâmica de espectro.

6.1.2. Comparação com outras técnicas de IC

Outras técnicas de IC também podem ser usadas em redes ópticas cognitivas, tais como a *Fuzzy Cognitive Maps* que é do tipo neuro-fuzzy, e os resultados comparados com o FCM.

6.1.3. Criação de uma arquitetura *Cross-Layer* e distribuída

Criação de uma arquitetura de controle cognitiva usando informações de diversas camadas de rede, não somente da camada óptica, tais como IP, OTN e distribuição das propriedades cognitivas entre o controlador remoto e os diversos elementos de rede, através de agentes autônomos.

6.1.4. Validação do algoritmo FCM em testbed experimental SDON

Implementação do algoritmo num *testbed* experimental com funcionalidades de redes ópticas definidas por *software* na qual será possível a obtenção de medidas de desempenho de rede em tempo real, através de monitores de rede, e a configuração e reconfiguração dos formatos de modulação dinamicamente através do protocolo *OpenFlow*, como proposto no item 5.4.

6.2. Artigos publicados em periódicos

TRONCO, T. R.; FERES, M. M.; CESAR, A. C., ROCHA, M. L.. Self-Configuration and Self-Healing for Cognitive Optical Networks. In: *Journal of Microwaves Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 12 (2013).

6.3. Artigos publicados em congressos e conferências

TRONCO, T. R.; FERES, M. M.; CESAR, A. C.; ROCHA, M. L.. Cognitive Optical Network Architectures. In: International Workshop on Telecommunications 2013 (IWT 2013), 2013, Santa Rita do Sapucaí, MG, Brazil.

TRONCO, T. R.; FERES, M. M.; ROMERO, M. A.; ROCHA, M. L.. Aplicação de Lógica Nebulosa em Plano de Controle GMPLS para Redes Ópticas Cognitivas. In: MOMAG, 2012, João Pessoa. 15°. SBMO Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 10°. CBMag Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2012.

Referências Bibliográficas

- [1] A. Ellis e N. Doran, "Are few-mode fibers a practical solution to the capacity crunch?", 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2013), Cartagena, Espanha, 23-27 de junho de 2013.
- [2] Infonetics Research, "10G/40G/100G Telecom Optics: Biannual Market Size and Forecasts", Abril de 2015, disponível em: http://www.infonetics.com/pr/chartpopup.asp?id=2015/charts/ms15_opl_2h14_chart.jpg. Acessado em 07/07/2015.
- [3] Cisco White Paper, "Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2014-2019", 17 de maio de 2015, disponível em: http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/ip-ngn-ip-next-generation-network/white_paper_c11-481360.pdf Acessado em: 07/07/15.
- [4] Recomendação ITU-T G.694.1, "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid", fevereiro de 2012.
- [5] D.M. Pataca, F.D. Simões, e M.L. Rocha, "Sistemas Ópticos de Próxima Geração", Cadernos CPqD Tecnologia, Vol. 7, n.2, julho/dezembro 2011.
- [6] I. Tomkos *et. al.*, "A Tutorial on the Flexible Optical Networking Paradigm: State-of-the-Art, Trends, and Research Challenges", Proceedings of IEEE, Maio de 2014.
- [7] I. Tomkos, "Flexible optical networking with spectral or spatial super-channels", IV International Workshop on Trends in Optical Technologies, 27 e 28 de Maio de 2015, CPqD, Campinas, SP, Brasil.
- [8] J. M. Fabrega *et al.*, "OFDM subcarrier monitoring using high resolution optical spectrum analysis", Optical Communication, vol. 342, Maio de 2015.
- [9] J. Tang, M. Xia, W. Li, K. Yang, D. Liu and B. Huang, Transmission performance of a 400 Gbit s⁻¹ all-optical orthogonal frequency division multiplexing system", Journal of Optics, Volume 15, Number 5, 2013.

- [10] O. Gerstel et al., “Elastic Optical Networking: A New Dawn for the Optical Layer?”, IEEE Communications Magazine, 2012.
- [11] S. Aleksic, Flexible, “Dynamic and Efficient Optical Transport Networks in Support of Emerging Services and Applications”, Workshop on New Paradigms for Routing in Optical Networks, Sao Paulo, Brazil, 2015.
- [12] Y. Ou, A. Hammad, S. Peng, R. Nejabati e D. Simeonidou, “Online and Offline Virtualization of Optical Transceiver”, Journal of Optical Communication Networking, Vol. 7, No. 8, August 2015.
- [13] IETF RFC 3945 – “Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture”, outubro de 2004.
- [14] N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan, G. Parulkar, L. Peterson, J. Rexford, S. Shenker e J. Turner, “OpenFlow: enabling innovation in campus networks,” ACM SIGCOMM Computer Communication Review, vol. 38, nº 2, 2008.
- [15] S. Das, “"Unified control architecture for packet and circuit network convergence", Ph.D. dissertation, Dept. Electr. Eng., Universidade de Stanford, Stanford, CA, USA, Junho de 2012.
- [16] D. Simeonidou, R. Nejabati, M. P. Channegowda, "Software Defined Optical Networks Technology and Infrastructure: Enabling Software-Defined Optical Network Operations", OFC/NFOEC Technical Digest © 2013 OSA.
- [17] S. Azodolmolky et al., “Integrated OpenFlow-GMPLS control plane: An overlay model for software defined packet over optical networks,” in Proc. 37th Eur. Conf. Exhibit. Opt. Commun., 2011.
- [18] S. Azodolmolky, P. Kokkinos, M. Angelou, E. Varvarigos, and I. Tomkos, “DICONET NPOT: An impairments aware tool for planning and managing dynamic optical networks”, J. Netw. Syst. Manag., vol. 20, no. 1, Março de 2012.
- [19] T. Jiménez et al., “A cognitive quality of transmission estimator for core optical networks”, J. Lightw. Technol., vol. 31, no. 6, Março de 2013.

- [20] A. Wang, j. Yu, "Cognitive Optical Networks: Key Drivers, Enabling Techniques and Adaptive Bandwidth Services", IEEE Communications magazine, janeiro de 2012.
- [21] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone e S. Matsuoka, "Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies", IEEE Communications Magazine, v. 47, n. 11, novembro de 2009.
- [22] R. Borkowski et al., "Cognitive Optical Network Testbed: EU Project CHRON", Journal of Optical Communications and Networking, vol. 7, n. 2, fevereiro de 2015. DOI: 10.1364/JOCN.7.00A344.
- [23] G. S. Zervas and D. Simeonidou, "Cognitive Optical Networks: Need, Requirements and Architecture", ICTON 2010.
- [24] R. M. Rolfe and B. A. Haugh, "Integrated Cognition – A Proposed definition of ingredients, a survey of systems, and example architecture", IDA Paper P-385, October 2004.
- [25] A. Aamodt and E. Plaza, "Case-based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches," AI Communications, vol. 7, 1994.
- [26] CHRON Project Report: "D3.1 Specification of the Architecture and Methods of the Cognitive Decision System", July 2011, available on: <http://www.ict-chron.eu>.
- [27] M. H. Hassoun, Fundamentals of Artificial Neural Networks. MIT Press, 1995.
- [28] I. N. da Silva, D. H. Spatti e R. A. Flauzino, "Redes Neurais Artificiais para Engenharia e Ciências Aplicadas", Editora Artliber, 2010.
- [29] C. J. A. BastosFilho *et al.*, "Mapping EDFA Noise Figure and Gain Flatness over the Power Mask Using Neural Networks", Journal of Microwave, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol. 12, SI-2, Julho de 2013.
- [30] K. F. Man, K. S. Tang and S. Kwong, Genetic Algorithms: Concepts and Designs. Springer Verlag, 1999.
- [31] H. Shatila, "Adaptive radio resource management in cognitive radio communications using fuzzy reasoning", Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Inst. and State Univ., 2012.

- [32] J. C. Bezdek, "Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms", Plenum Press, New York, 1981.
- [33] J. Mitola, "Cognitive Radio - An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio", Ph. D. Dissertation, Royal Institute of Technology (KTH), maio de 2000.
- [34] S. Haykin, "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.23, No. 2, fevereiro de 2005.
- [35] Federal Communications Commission, "Notice of proposed rulemaking on cognitive radio," Tech. Rep. FCC 03-322, FCC, 2003.
- [36] R. W. Thomas et al., "Cognitive Networks", IEEE 2005.
- [37] D.D. Clark et al., "A Knowledge Plane for the Internet", Proceedings of SIGCOMM 2003, 25-29 de agosto de 2003.
- [38] R. W. Thomas, "Cognitive Networks", Ph.D. Dissertation, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 15 de junho de 2007.
- [39] C. Fortuna and M. Mohorcic, "Trends in the development of communication networks: Cognitive networks", Computer Networks 53, 2009.
- [40] <http://bicasociety.org/>, acessado em 06/07/2015.
- [41] <http://bicasociety.org/cogarch/>, acessado em 06/07/2015.
- [42] D. Kliazovich *et al.*, "CogProt: A Framework for Cognitive Configuration and Optimization of Communication Protocols", MobiLight 2010, LNICST 45, 2010.
- [43] P. Demestichas, G. Dimitrakopoulos and Y. Kritikou, "Policy-Based Management of Radio Resources and Autonomic Computing in Cognitive/ Reconfigurable Networks and Systems", White paper developed within WG6 of WWRF, 2007.
- [44] G. Dimitrakopoulos et al., "Introduction of cognitive systems in the wireless world - Research achievements and future challenges for end-to-end efficiency", Future Network & Mobile Summit 2010.

- [45] Tomkos, I., “Next generation Flexible and Cognitive Heterogeneous Optical Networks Supporting the Evolution to the Future Internet”, Lecture Notes in Computer Science, Volume 7281, 2012.
- [46] IETF RFC 3945 - "Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture", outubro de 2004.
- [47] CHRON Project Document, “D2.1 Specification of the network scenario and service requirements”, November 28, 2011, disponível em: <http://www.ict-chron.eu/Content/Deliverables.aspx>.
- [48] T. Jiménez *et al.*, “A cognitive quality of transmission estimator for core optical networks”, J. Lightw. Technol., vol. 31, no. 6, março de 2013.
- [49] http://cms.comsoc.org/eprise/main/SiteGen/TC_CN/Content/Home.html, acessado em 06/07/2015.
- [50] <http://www.ieee802.org/21/index.html>, acessado em 06/07/2015.
- [51] <http://www.ieee802.org/22/>, acessado em 06/07/2015.
- [52] IEEE 802.16m System Requirements, Draft submitted 2010.
- [53] COST Action IC0902, disponível em: <http://newyork.ing.uniroma1.it/IC0902/>, acessado em 06/07/2015.
- [54] Draft revisado da Recomendação ITU-T G.694.1, 5 a 16 de dezembro de 2011.
- [55] IETF Internet-Draft-wang-ccamp-flexigrid-wavelength-range-ospf-00.txt, “OSPF extensions for support wavelength range allocation in flexible grid”, fevereiro de 2011.
- [56] IETF Internet-Draft-zhang-ccamp-flexible-grid-rsvp-te-ext-00.txt, “RSVP-TE Signaling Extensions in support of Flexible Grid”, outubro de 2011.
- [57] IETF Internet-Draft-hussain-ccamp-super-channel-label-00.txt, “Generalized Label for Super-Channel Assignment on Flexible Grid”, julho de 2011.

- [58] C. Facchini, “Bridging the Gap Between Theory and Implementation in Cognitive Networks: Developing Reasoning in Today’s Networks”, Ph.D. Thesis, DISI – Universidade de Trento, dezembro de 2011.
- [59] D. Kliazovich *et al.*, “Survey on Signaling Techniques for Cognitive Networks”, IEEE 16th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), 2011.
- [60] N. Baldo e M. Zorzi, "Fuzzy Logic for Cross-layer Optimization in Cognitive Radio Networks", IEEE Communications Magazine, abril de 2008.
- [61] T. J. Ross, “Fuzzy Logic with Engineering Applications”, ISBN: 978-0-470-74376-82010, Editora Wiley, 2010.
- [62] S. M. Nassar, “Métodos de Desfuzzificação”, disponível em: <http://www.inf.ufsc.br/~silvia/disciplinas/sed/aulas/M%C9TODOS%20DE%20DESFUZZIFICA%C7%C3O.doc>, acessado em 20/09/2015.
- [63] T. R. Tronco, M. M. Feres, M. A. Romero e M. L. Rocha, “Aplicação de Lógica Nebulosa em Plano de Controle GMPLS para Redes Ópticas Cognitivas”. In: MOMAG, 2012, João Pessoa. 15°. SBMO Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 10°. CBMag Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2012.
- [64] ITU-T Recommendation G.663 – Amendment 1 – “Optical Fibers and Amplifiers”, 2003.
- [65] T. R. Tronco, M. M. Feres, A. C. Cesar, M. L. Rocha, “Self-Configuration and Self-Healing for Cognitive Optical Networks”. In: *Journal of Microwaves Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 12 (2013).
- [66] H. A. Arnaldo, “Novos Métodos Determinísticos para Gerar Centros Iniciais dos Grupos no Algoritmo Fuzzy C-Means e Variantes”, tese de mestrado apresentada ao Departamento de Informática e Matemática da Universidade Federal do Rio Grande do Noret, fevereiro de 2014.
- [67] A. M. Moutinho e V. S. S. R. Silva, “Aplicação do Algoritmo de Categorização FCM e Avaliação das Medidas ICC e CS”, e disponível em: <http://www.adrianomoutinho.com/>

adrianomoutinho/meus-trabalhos/trabalhos-diversos/category/2-trabalhosdiversos?download=13%3Afcmm-com-testes-de-icc-e-cs.pdf. Acessado em 23/06/15.

- [68] M. Andrade e M. A. P. Jacques, “Estudo Comparativo de Controladores de Mamdani e Sugeno para Controle do Tráfego em Intersecções Isoladas”, disponível em http://sinaldetransito.com.br/artigos/Mamdani_e_Sugeno.pdf, acessado em 20/09/2015.
- [69] D. M. Pataca *et al.*, "Transmissão de um Supercanal OFDM de 1,12 Tb/s por 452 km com Eficiência Espectral de 4 b/s/Hz, SBrT'2012, 13 a 16 de Setembro de 2012, Brasília, DF.
- [70] W. Freude *et al.*, "Quality Metrics for Optical Signals: Eye Diagram, Q-factor, OSNR, EVM and BER", ICTON 2012.
- [71] R.J. Essiambre *et. al.*, "Capacity Limits of Optical Fiber Networks", Journal of Lighthwave Technology, vol. 28, no. 4, 15 de fevereiro de 2010.
- [72] C. S. Martin e S. W. Kim, “Progress in Pattern Recognition, Image Analysis, Computer Vision, and Applications”, LNCS 7042, Editora Springer, 2011.
- [73] <http://stackoverflow.com/questions/24309974/time-complexity-of-euclidean-distance>, acessado em 05/07/2015.