



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Yara Martins

**ESTUDO DE REDES ÓPTICAS AVANÇADAS PARA
APLICAÇÃO METROPOLITANA-ACESSO BASEADAS EM
COMUTAÇÃO FOTÔNICA**

Campinas
2015



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Yara Martins

**ESTUDO DE REDES ÓPTICAS AVANÇADAS PARA
APLICAÇÃO METROPOLITANA-ACESSO BASEADAS EM
COMUTAÇÃO FOTÔNICA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Elétrica, na Área de concentração Telecomunicações e Telemática.

Orientador: Prof. Dr. Edson Moschim
Co-orientador: Prof. Dr. Felipe Rudge Barbosa

Este exemplar corresponde a versão final da tese defendida pela aluna Yara Martins e orientada pelo Prof. Dr. Edson Moschim

Campinas
2015

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

M366e Martins, Yara, 1976-
Estudo de redes ópticas avançadas para aplicação metropolitana-acesso baseadas em comutação fotônica / Yara Martins. – Campinas, SP : [s.n.], 2015.

Orientador: Edson Moschim.
Coorientador: Felipe Rudge Barbosa.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Comunicações ópticas (Transmissão de dados). 2. Comutação de pacotes. 3. Engenharia de tráfego. I. Moschim, Edson, 1953-. II. Barbosa, Felipe Rudge. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Study on advanced optical networks for application on metro-access based on photonic switching

Palavras-chave em inglês:

Optical communication (Data transmission)

Packet switching

Traffic engineering

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Mestra em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Edson Moschim [Orientador]

Felipe Rudge Barbosa

Reinaldo Golmia Dante

Paulo Cardieri

Data de defesa: 14-12-2015

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA – TESE DE MESTRADO

Candidata: Yara Martins RA: 85088

Data da Defesa: 14 de dezembro de 2015

Título da Tese: “Estudo de Redes Ópticas Avançadas para Aplicação Metropolitana- Acesso baseadas em Comutação Fotônica”

Prof. Dr. Felipe Rudge Barbosa (Presidente) - DSIF/FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Reinaldo Golmia Dante – IFSP/Sertãozinho

Prof. Dr. Paulo Cardieri – DECOM/FEEC/UNICAMP

A ata de defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no processo de vida acadêmico do aluno.

Agradecimentos

Em especial, gostaria de agradecer ao Prof. Edson Moschim pela orientação, pelas cobranças, incentivos e pela oportunidade de ter me aceitado no seu distinto grupo de trabalho.

Ao Prof. Felipe Rudge, amigo e mentor, pelo dedicado trabalho de co-orientação e apoio constante, sem os quais eu não teria ânimo para concluir essa empreitada.

À minha querida irmã Indayara, que não me deixou em paz enquanto não terminei o trabalho, pelo seu incentivo constante, cobranças por pontualidade e pela motivação quando tudo parecia distante de se alcançar.

Agradeço à empresa em que trabalho LG, em especial aos meus colegas de equipe e amigos, ao Flávio Fernandez e Mário Dias pela atenção dada a mim, por compartilharem seus conhecimentos técnicos e também aos gerentes Sandro Danguì e Carlos Toneto pela confiança em mim depositada.

À minha família e aos amigos queridos, por sempre me apoiarem, animarem e torcerem pelo meu sucesso.

Este trabalho foi uma tarefa de perseverança planejada e executada durante vários anos, em momentos tirados, muitas vezes do tempo restrito da vida cotidiana, mas que me enriqueceram em conhecimento, em vivência e, hoje me sinto agradecida e realizada pelo resultado.

Resumo

Neste trabalho é analisado o desempenho de redes ópticas com arquitetura baseada em chaveamento fotônico aplicado em topologias de malha. O desempenho é avaliado considerando a confiabilidade e a eficácia na entrega dos pacotes ópticos (origem-destino) nas redes metropolitanas de acesso (metro-acesso), tendo como clientes os usuários das redes sem-fio (*fiber-wireless*, FiWi). Os principais parâmetros utilizados para as análises são: o número médio de saltos (ANH), o atraso médio (Am) e a fração de perda de pacotes (PLF). A combinação desses parâmetros prova que as redes ópticas com arquiteturas baseadas em chaveamento fotônico com topologia em malha apresentam alta vazão, baixo atraso e baixa perda de pacotes. Este trabalho contribui para projetos de redes ópticas metro-acesso flexíveis que atendam à demanda dos usuários com ênfase em tráfego de pacotes, seja no ambiente sem-fio, seja nas próprias redes ópticas, considerando-se também o equilíbrio entre custo e desempenho das redes.

Palavras-chave: Chaveamento Fotônico, Redes Ópticas Metropolitanas de Acesso, Topologia de Rede Óptica, Atraso médio.

Abstract

In this work, the performance of optical networks with architecture based on photonic switching and on mesh topologies is analyzed. The performance of networks is evaluate in terms of traffic, reliability and efficiency of optical packets delivery (origin-destination) for metropolitan access networks (metro-access), which have the wireless networks (fiber-wireless FiWi) as customers. The main parameters used for this analysis are the average number of hops (ANH), Delay (A_m) and packet loss fraction (PLF). The combination of these parameters proves that optical networks with architecture based on photonic switching and mesh topology provide high efficiency in throughput with low packet loss and delay. Thus, this work contributes to design flexible optical metropolitan networks that meet users' demand with emphasis on packet traffic in the wireless environment or in the optical networks, also considering the balance between cost and performance of the network.

Keywords: *Fotonic Switching, Access Metropolitan Óptical Networks, Topology of Optical Networks, Delay.*

Lista de ilustrações

Figura 1.1: Evolução das taxas de dados nas redes móveis [1.10].....	18
Figura 2.1: Evolução dos sistemas celulares através de suas gerações [2.5].	24
Figura 2.2: Versões 3GPP.....	28
Figura 2.3: Agregação de portadora – FDD; a R10 pode alocar recursos DL e UL em até cinco componentes da portadora (CC) [2.12].	29
Figura 2.4: Diferentes cenários de CA [2.12].....	32
Figura 2.5: Agregação de portadora inter-banda [2.12]	32
Figura 3.1: Redes Tronco (Longa Distância), Metropolitana e Acesso [3.5].....	39
Figura 3.2: Redes WDM e Metro-Acesso com aplicações	40
Figura 3.3: IP sobre WDM. [3.9].....	41
Figura 4.1: Fluxograma de cálculo do ANH para uma dada topologia [4.6],[4.7].	51
Figura 4.2: Rede com topologia MS genérica.....	54
Figura 4.3: Redes grau 3: (a) MS-16, (b) MS-25, enlaces unidirecionais.....	55
Figura 4.4: Rede MS-híbrida – OPS/OBS: (a) MS-16 e (b) MS-25 . Enlaces unidirecionais.....	56
Figura 4.5: Nó óptico	57
Figura 4.6: Pacote óptico para comutação fotônica.....	58
Figura 4.7: Esquemático da Simulação	59
Figura 4.8: Geração de tráfego	59
Figura 5.1: Rede MS-16 e roteamento DR: (a) ANH, (b) Atraso médio (<i>Am</i>).....	65
Figura 5.2: Rede MS-25 e roteamento DR: (a) ANH, (b) Atraso médio (<i>Am</i>)	66
Figura 5.3: (a) <i>PLF</i> - MS-16, (b) <i>PLF</i> - MS-25 roteamento DR	67
Figura 5.4: Rede MS-16 e roteamento SF: (a) ANH, (b) Atraso médio (<i>Am</i>).....	69
Figura 5.5: Rede MS-25 e roteamento SF: (a) ANH, (b) Atraso médio (<i>Am</i>).....	70
Figura 5.6: (a) <i>PLF</i> - MS-16, (b) <i>PLF</i> - MS-25 roteamento SF.....	71
Figura 5.7: Rede MS-16 e roteamento DR: (a) ANH, (b) Atraso médio (<i>Am</i>).....	73
Figura 5.8: Rede MS-25 e roteamento DR: (a) ANH, (b) Atraso médio (<i>Am</i>).....	74
Figura 5.9: (a) <i>PLF</i> - MS-16, (b) <i>PLF</i> - MS-25 roteamento DR	75
Figura 5.10: Rede MS-16 e roteamento SF: (a) ANH, (b) Atraso médio (<i>Am</i>)	76
Figura 5.11: Rede MS-25 e roteamento DR: (a) ANH, (b) Atraso médio (<i>Am</i>)	77
Figura 5.12: (a) <i>PLF</i> - MS-16, (b) <i>PLF</i> - MS-25 roteamento SF	78

Lista de tabelas

Tabela 1.1: Assinantes de internet móvel [1.8]	17
Tabela 2.1: Metas de desempenho do LTE, IMT Advanced e LTE Advanced [2.10].....	29
Tabela 2.2: Frequências de transmissão do LTE suportadas FDD e TDD[2.15]	30
Tabela 2.3: Características padronizadas de QCI [2.16]	34
Tabela 4.1: Parâmetros fixos utilizados na simulação	60
Tabela 4.2: Parâmetros variáveis ajustados a cada simulação	60
Tabela 5.1: Cálculo das capacidades - Total C_t e Útil C_u da rede, topologia MS e para o protocolo SF.....	62

Lista de Acrônimos e Abreviações

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
1xRTT	<i>1 Times Radio Transmission Technology</i>
ANH	<i>Average Number of Hops</i> - Número Médio de Saltos
Am	Atraso médio
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i> - Modo de Transferência Assíncrono
BCP	<i>Burst Control Packet</i> - Pacote de Controle de Rajada
BER	<i>Bit Error Rate</i> - Taxa de erro de bit
CA	<i>Carrier Agregation</i> - Agregação de Portadora
CC	<i>Component Agregation</i> - Agregação de Componente
CBR	<i>Constant Bit Rate</i> -Taxa Constante de Bit
CDMA	<i>Code division multiple Access</i> - Acesso Múltiplo por Divisão de Código
CDMA EVDO	<i>Code division multiple Access,Evolution-Data Optimized</i> – Acesso Múltiplo por Divisão de Código, Evolução de Dados Otimizados
Cm:	Caminho mínimo
CoMP	<i>Coordinated Multi-Point</i> - Multiponto Coordenado
DL	<i>Downlink</i>
DR	<i>Deflection Routing</i> - Roteamento por deflexão
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> - Multiplexação por comprimento de onda densa
EDGE	<i>Enhanced Data rates for GSM Evolution</i> - Evolução GSM para taxa de dados melhoradas
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
eICIC	<i>Enhanced Inter-Cell Interference Coordination</i>
ESCON	<i>Enterprise Systems Connection</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standard Institute</i>
E-UTRA	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access</i>

FDD *Frequency Division Duplex*

FDL *Fiber Delay Line - Linha de Atraso de Fibra*

FICON *Fiber Connection*

GBR *Guarantee Bit Rate*

GMPLS *Generalized Multi-Protocol Label Switching*

GPRS *General Packet Radio Service*

GSM *Global System for Mobile Communications - Comunicação Móvel para Sistema Global*

HDTV *High-Definition Television - Televisão de Alta Definição*

HDLC *High-level Data Link Control*

HMS *Manhattan St. híbrida*

HSPA *High Speed Packet Access*

IMT-Advanced *International Mobile Telecommunications-Advanced*

IMEI *International Mobile Equipment Identity*

IP *Internet Protocol - Protocolo de Internet*

ITU *International Telecommunication Union*

ITUR *International Telecommunication Union - Radio communications sector*

IS-136 *Interim Standard-136*

IS-95 *Interim Standard-95*

LTE *Long Term Evolution*

LTE-A *Long Term Evolution- Advanced*

LTF *Laboratório de Tecnologia Fotônica*

MIMO *Multi-Input Multi-Output*

MS *Manhattan Street topology - Topologia Manhattan Street*

MSq *Manhattan Street topology - Topologia Manhattan Street quase regular*

NS *Network Simulator - Simulador de rede*

non-GBR *non-Guarantee Bit Rate*

OBS *Optical Burst Switching - Chaveamento de rajada óptica*

OCS *Optical circuit switching - Chaveamento de circuitos ópticos*

OE	Ópto-Elétrico
OPS	<i>Optical packet Switching</i> - Chaveamento de pacote óptico
OPSN	<i>Optical Packet Switching Network</i> - Redes de Chaveamento de Pacote Óptico
P2P	<i>Peer-to-Peer</i> - Ponto a ponto
PC	Pacote de tamanho Constante
PCIV	Pacote de tamanho Constante e Intervalo entre pacotes Variável
PDC	<i>Japanese Personal Digital Access</i>
PDH	<i>Plesiochronous Digital Hierarchy</i>
PERL	<i>Packet Error Loss Rate</i>
PLF	<i>Packet Loss fraction</i> - Fração de Perda de Pacotes
POTS	<i>Plain old telephone service</i>
PPP	<i>Point-to-Point Protocol</i> – Protocolo ponto-a-ponto
PV	Pacote de tamanho Variável
PVIV	Pacote de tamanho Variável e Intervalo entre pacotes Variável
QCI	<i>QoS Class Identifier</i>
QoS	<i>Quality of Service</i> - Serviço de qualidade
RMDA	Redes Metrolopolitanas de Distribuição de Acesso
RMA	Redes Metropolitanas de Acesso
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i> – Hierarquia Digital Síncrona
SF	<i>Store-and-Forward</i> - Armazena e encaminha
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
SON	<i>Self-Optimizing Network</i> - Redes Auto-Otimizadas
SONET	<i>Synchronous optical networking</i> – Rede Óptica Síncrona
SIP	<i>Session Initiation Protocol</i>
TDD	<i>Time-Division Duplex</i>
TDMA	<i>Time Division Multiplex Access</i>
TTL	<i>Time To Live</i> - Tempo de Vida
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>

UE	<i>User Equipment – Equipamento do usuário</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
UP	<i>uplink</i>
VOD	<i>Video on demand -Vídeo sobre demanda</i>
VOIP	<i>Voice over IP -Voz sobre IP</i>
VoLTE	<i>Voice over LTE - Voz sobre LTE</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
WCMDA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WiMax	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WiFi	<i>Wireless Fidelity - Fidelidade sem fio</i>
WLAN	<i>Wide Local Area Network</i>
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>
WWAN	<i>Wireless Wide Area Network</i>

Sumário

1.	Introdução	16
	Referências	21
2.	Evolução dos Sistemas de Comunicação Sem-fio.....	22
2.1.	A Evolução dos Sistemas Celulares	22
2.1.1.	Segunda Geração (2G).....	22
2.1.2.	Terceira Geração (3G).....	23
2.1.3.	Quarta Geração (4G).....	24
2.1.4.	Distribuição Geográfica	25
2.2.	Cenário tecnológico atual	26
2.2.1.	LTE Advanced.....	27
2.2.1.	Voz sobre LTE (VoLTE)	33
2.3.	Comentários.....	34
	Referências	36
3.	Transporte Óptico Metropolitano	38
3.1.	Redes Ópticas	38
3.2.	Comutação de Pacotes Ópticos – OPS	41
3.3.	Comutação de Rajadas Ópticas – OBS	43
3.4.	Protocolos de Roteamento	44
3.4.1.	<i>Store and Forward</i> (SF).....	44
3.4.2.	<i>Deflection Routing</i> (DR).....	45
3.5.	Resolução de contendas.....	46
	Referências	48
4.	Definição de parâmetros, conceitos básicos e metodologia	50
4.1.	Parâmetros Utilizados para Avaliar o Desempenho das Redes.....	50
4.2.	Topologia Malha para redes OPS/OBS	53
4.3.	Configuração do Simulador e Metodologia	56
	Referências	61
5.	Resultados Analíticos e Simulações Computacionais	62
5.1.	Resultados analíticos	62
5.2.	Resultados de Simulações	63

5.2.1. Tráfego PCIV	64
5.2.2. Tráfego PVIV	72
Referências	80
6. Conclusão	82
6.1. Trabalhos Futuros.....	83
6.2. Trabalhos Publicados.....	84

1. Introdução

A evolução das redes ópticas como *backbone* de todos os serviços, é hoje uma realidade mundial. Além disso, pode-se ver um aumento de banda ano a ano, sendo utilizada e demandada pelos sistemas móveis, através de celulares inteligentes (*smartphones*), *tablets*, e computadores portáteis (*laptops/notebooks*). Assim, a convergência de redes *wireless* e redes ópticas vêm acontecendo, cada vez mais de forma integrada e dinâmica. Entretanto, resta a busca de novas soluções e de protocolos, bem como de tecnologias que tornem essa convergência mais eficaz.

Este trabalho tem como objetivo principal o estudo de redes ópticas, utilizando tecnologias baseadas em chaveamento fotônico (*photonic switching*) [1.1], adequadas ao panorama convergente de múltiplas tecnologias, visando a eficiência e a capacidade efetiva das Redes Metropolitanas de Distribuição e Acesso (RMDA). As redes ópticas avançadas (redes fotônicas) apresentam-se como solução ótima, contemplando baixa latência, alta vazão (*throughput*) e alta eficiência energética [1.2][1.3][1.4]. E as redes *wireless*, que com sua enorme flutuação de demanda e dinâmica aleatória de comutação e roteamento, serão consideradas aqui apenas como clientes das redes fotônicas.

O aumento da utilização dos serviços de dados *on-line*, tais como ponto a ponto (P2P), serviços áudio visuais de alta definição HDTV (*High Definition Television*), VOD (*Video on Demand*), transmissão de voz utilizando a *Internet* (VOIP) e redes sociais, bem como o desenvolvimento do acesso em banda larga, através da rede fixa óptica ou móvel 4G, resultaram em um crescimento exponencial de tráfego em redes de comunicação [1.8].

Na Tabela 1.1 [1.8] mostra-se que em 2013, 900 milhões dos 2,2 bilhões de assinantes de *Internet* móvel estão conectados via 2G; enquanto 1,3 bilhões estão

conectados via banda larga móvel. Em 2020, estima-se que dos 3,8 bilhões de usuários de internet móvel, reduzirão para 800 milhões o número de assinantes de internet 2G e aumentará mais que o dobro o número de usuários de Internet de banda larga, atingindo-se três bilhões, ou seja, a metade da população global estará conectada à Internet móvel.

Tabela 1.1: Assinantes de internet móvel [1.8]

Assinantes de internet Móvel	2013	2020
Global	2,2 bilhões	3,8 bilhões
<i>Regiões desenvolvidas</i>	<i>0,7 bilhões</i>	<i>0,8 bilhões</i>
<i>Regiões em desenvolvimento</i>	<i>1,5 bilhões</i>	<i>3,0 bilhões</i>
2G	0,9 bilhões	0,8 bilhões
3G/4G	1,3 bilhões	3,0 bilhões
Assinantes de internet Móvel crescimento (% população)		
Global	30%	50%
<i>Regiões desenvolvidas</i>	<i>59%</i>	<i>71%</i>
<i>Regiões em desenvolvimento</i>	<i>25%</i>	<i>45%</i>

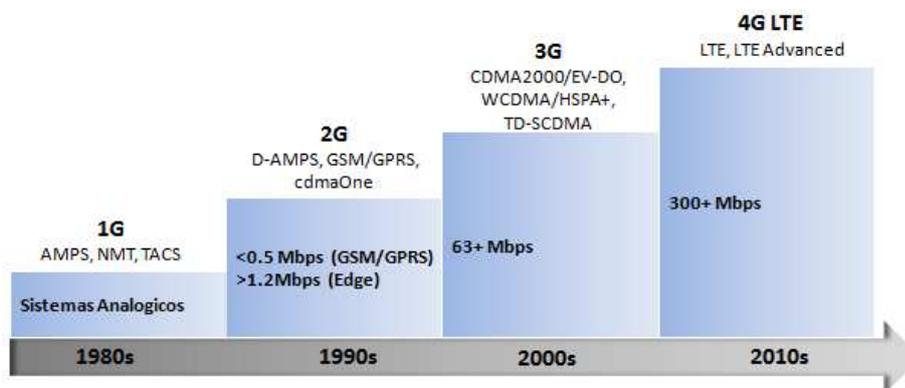
Este cenário é desafiador para o planejamento a curto prazo das redes necessárias para suportarem estas crescentes demandas de capacidade, que além de oferecerem confiabilidade, escalabilidade, flexibilidade a um baixo custo para o usuário final, devem apresentar maior eficiência no consumo de energia.

A evolução da tecnologia móvel (Cap.2) se deu em função do aumento da utilização de serviços oferecidos pelos dispositivos móveis e pela necessidade por maiores taxas de transmissão de dados. A primeira geração foi apenas uma transposição da telefonia analógica comutada (POTS) para a sistemática celular sem fio. A segunda geração (2G) das redes móveis implementou a comunicação digital banda-base, e o GSM

(*Global System for Mobile Communications*) foi o primeiro sistema de comunicação móvel digital que surgiu na Europa para substituir o sistema 1G e projetado para oferecer basicamente serviço de voz e mensagens, mas não serviu para a comunicação de dados. Devido à crescente demanda na transmissão de dados, foram desenvolvidas novas tecnologias, como GPRS e EDGE (2.5), UMTS, e HSPA compondo assim a terceira geração (3G). Mais recentemente, a tecnologia LTE e outras evoluções, fazem parte da quarta geração (4G). Do 3G para o 4G existem basicamente dois grandes objetivos: atingir maiores taxas de transmissão e substituir o conceito de comutação de circuito para o de comutação de pacotes. As redes 4G são baseadas exclusivamente no *Internet Protocol (IP)*. [1.9][1.10].

As redes sem fio até o momento tiveram como destaque o aumento nas taxas de transmissão de dados. Demonstra-se na Figura 1.1 [1.10] a evolução das tecnologias sem fio até a 4G. As redes 4G já são uma realidade no mundo das redes de telefonia celulares, tendo previsão para terminar sua implantação na maioria dos países até 2020 e o foco será passar para a quinta geração da tecnologia móvel. Os padrões tecnológicos para o 5G ainda não foram definidos, porém espera-se velocidades muito mais altas, menor consumo de bateria, maior confiabilidade e uma grande mudança no modo de utilizar a Internet.

Figura 1.1: Evolução das taxas de dados nas redes móveis [1.10]



Os dispositivos conectados irão revolucionar a natureza do tráfego móvel, portanto será necessário ter uma tecnologia capaz de sustentar o uso intenso da

banda larga. A tendência atualmente estabelecida é a convergência dos sistemas *wireless* sobre as redes ópticas. Com isso tem-se a mobilidade dos sistemas sem fio, aliada à enorme capacidade dos sistemas ópticos.

Para oferecer conjuntos de soluções que servirão para o planejamento de redes que atenda as demandas atuais e futuras, de modo confiável e consistente, analisaremos através de simulações computacionais, as configurações de Redes Metro Acesso (RMA) incluindo nós de chaveamento fotônico [1.4][1.5][1.6][1.7].

A apresentação deste trabalho segue o seguinte formato:

O Capítulo 1 é a presente Introdução.

No Capítulo 2 é feito um breve histórico da evolução das tecnologias de redes sem fio, mais especificamente os sistemas celulares, através de suas gerações. É mostrado o cenário tecnológico atual com as suas vantagens. É visto que os sistemas de telefonia celular evoluíram para atender a demanda de múltiplos usuários e multi-serviços, baseados principalmente em redes de dados como a Internet, com elevada utilização de transporte de pacotes (tipo *Ethernet*). É nesse cenário que se requer uma demanda por mais banda, por mais flexibilidade e mobilidade. Assim, o uso da banda larga pode suportar um tráfego agregado com interconexões ópticas de alta capacidade em todas as redes tronco metropolitanas (*backbones*).

No Capítulo 3, faz-se uma revisão do estado da arte dos protocolos de roteamento e de métodos de transporte nas redes ópticas de metro-acesso. Em particular são escolhidos os protocolos DR (*Deflection Routing*) e SF (*Store and Forward*), especialmente adequados ao transporte em tecnologias de comutação fotônica. O cenário em estudo (metro-acesso) são regiões urbanizadas e com alta demanda de tráfego. Propõe-se assim uma direta transposição de pacotes eletrônicos das redes clientes (ênfase *wireless*) em pacotes ópticos, e sua transmissão transparente (independente de taxa e formato) com roteamento e chaveamento fotônico nos nós da rede.

No Capítulo 4 são apresentados e definidos os parâmetros utilizados nas simulações. As configurações de topologias utilizadas, procedimentos e metodologia para obtenção dos resultados a serem analisados no Capítulo 5.

No Capítulo 5, apresentam-se os resultados das simulações computacionais tais como: número médio de saltos (ANH), atraso médio (Am) e fração de perda de pacotes (PLF), parâmetros que foram utilizados para analisar o desempenho de redes ópticas baseadas em chaveamento fotônico e topologias de malha. Os protocolos utilizados são o DR e o SF, e os tráfegos gerados são constantes e variáveis (PCIV e PVIV).

Por fim o Capítulo 6 é a Conclusão, com os comentários finais, propostas de continuidade e trabalhos futuros.

Referências

- [1.1] Martin Maier, *Optical Switching Networks*, Cambridge University Press; (2008).
- [1.2] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communications Systems*, 3rd. ed., John Wiley, New York, 2002.
- [1.3] Giozza, W. F., Conforti, E., Waldman, H., *Fibras Ópticas: Tecnologia e Projeto de Sistemas*, Makron, McGraw-Hill, 1991.
- [1.4] F. R. Barbosa, “Redes Óticas” – curso de pós-graduação, FEEC – Unicamp – SP, Disponível em: <http://www.dsif.fee.unicamp.br/~rudge/>
- [1.5] I. B. Martins, “Análise de Desempenho e Proteção em Redes Ópticas Convergentes com Chaveamento Fotônico”, Tese de Doutorado, FEEC/Unicamp, 2011
- [1.6] F. R. Barbosa, I. B. Martins, Y. Martins e E. Moschim, “Comparative Study of Latency and Throughput in OPS/OBS Metro Access Network”, *Networks’ 2014 – Madeira PT, Sept 2014*.
- [1.7] Y. Martins, F. R. Barbosa, I. B. Martins e E. Moschim, “Influence of Topology Connectivity for Transport in Optical Networks with Amplified Photonic Switches”, *Icton Graz 2014 – Austria PT, July 2014*.
- [1.8] GSMA, “Half of the world’s population connected to the mobile internet by 2020”, disponível em: <http://www.gsma.com/newsroom/press-release/> (Janeiro 2015).
- [1.9] H. Holma, A. Toskala, *LTE for UMTS – Evolution to LTE-Advanced*, Wiley; 2 edition (April 25, 2011).
- [1.10] QUALCOMM. “The Evolution of Mobile Technologies: 1G->2G->3G->4G LTE”, disponível em: <http://www.qualcomm.com/media/documents/> (Janeiro 2015).
- [1.11] QUALCOMM. “Qualcomm’s 5G vision”, disponível em: <https://www.qualcomm.com/documents/qualcomm-5g-vision-presentation/> (July 2015)

2. Evolução dos Sistemas de Comunicação Sem-fio

Este capítulo faz um breve histórico da evolução das comunicações sem-fio, em particular sistemas celulares, através de suas gerações. Será mostrado o cenário tecnológico atual enfatizando suas vantagens e também a importância das redes sem fio em estar aliadas, apoiadas com as redes ópticas que possuem alta capacidade de transmissão de dados, sendo assim o objeto de argumentação relevante para a dissertação.

2.1. A Evolução dos Sistemas Celulares

No início dos anos 90 os sistemas celulares eram baseados em comunicação analógica. A partir do ano de 1992 houve uma grande virada para os sistemas digitais, promovendo uma concorrência entre as tecnologias.

Os sistemas celulares digitais foram definidos pelas famílias IS-136 (TDMA), IS-95 (CDMA) e GSM, que concorrentemente tentavam estabelecer seu padrão no mercado. Com a evolução das tecnologias através de suas gerações, houve uma convergência para o padrão GSM. As gerações dos sistemas de celulares foram impulsionadas pela evolução da utilização de dados devido à aplicações que exigem maior largura de banda e também a exigência dos usuários que estão habituados com o desempenho oferecido pelas redes fixas. Assim sendo, espera-se que a rede móvel lhes ofereça um desempenho com a mesma qualidade e velocidade. A seguir, temos a evolução dos celulares através de suas gerações:

2.1.1. Segunda Geração (2G)

A Segunda Geração (2G) é o primeiro sistema de comunicação móvel digital, composto pelos padrões GSM (*Global System for Mobile Communications*) que surgiu

na Europa em meados dos anos 80 e introduzido comercialmente em 1992, o TDMA (*Time Division Multiple Access*) e o CDMA (*Code Division Multiple Access*) nos Estados Unidos e o PDC (*Japanese Personal Digital Cellular*) no Japão [2.1].

Inicialmente foram estabelecidos alguns objetivos para guiar o desenvolvimento desses padrões, como, por exemplo:

- Padronização (*roaming*), permitindo uma linha telefônica oriunda de um determinado local funcionar em redes de outros lugares (cidades ou países), a partir da infraestrutura da mesma operadora ou de empresas conveniadas a esta;
- Segurança por meio da utilização do dispositivo chamado SIM (*Subscriber Identity Module*), característica da tecnologia GSM, o IMEI (*International Mobile Equipment Identify*) que é uma sequência numérica definida pelo fabricante e exclusiva para cada aparelho. Proteção via criptografia para evitar que os dados dos usuários sejam indevidamente interceptados;
- Disponibilização de novos serviços tal como o SMS (*Short Message Service*).

Em 2003, foi introduzida nas redes GSM uma melhoria chamada EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*), que possibilita trocas de pacotes de conexão com a internet. O GSM e o CDMA possuem extensões que permitem a oferta de serviços de dados por pacotes sem necessidade de estabelecimento de uma conexão (conexão permanente) a taxas de até 144 kbps. As principais tecnologias são o GPRS e o EDGE para o GSM, e o 1XRTT para o CDMA.

2.1.2. Terceira Geração (3G)

Os principais sistemas da Terceira Geração (3G) são o WCDMA/HSPA e o CDMA EVDO que oferecem serviços de dados, como multimídia, vídeo e o acesso à Internet através serviços IP com taxas maiores que 256 kbps. O serviço 3G foi inicialmente liberado na Europa através do ITUR (*International Telecommunications Union – Radiocommunications sector*) e ETSI (*European Telecommunications Standard Institute*) e teve como objetivo criar um sistema móvel de terceira geração por volta

do ano 2000. Esse sistema foi denominado UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) [2.2]. As redes de terceira geração estão apoiadas na infra-estrutura das respectivas redes de segunda geração. Para a padronização detalhada do UMTS estabeleceu-se o 3GPP, aliança norte americana, europeia e asiática voltada para a produção e para a viabilização do novo padrão universal UMTS.

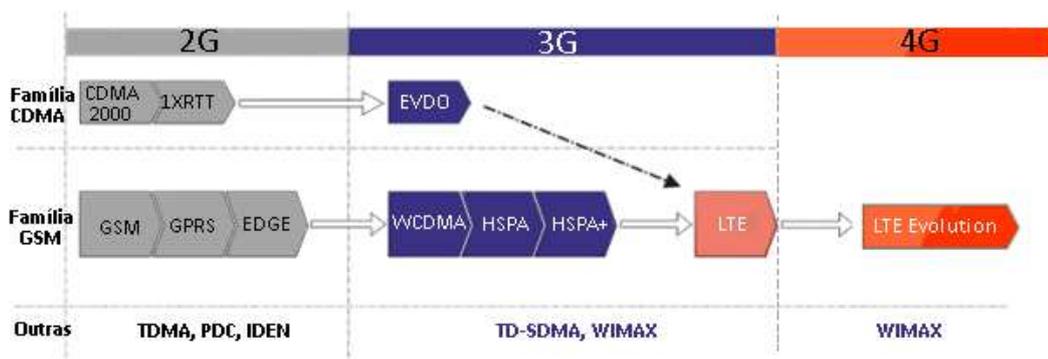
2.1.3. Quarta Geração (4G)

O desenvolvimento da quarta geração (4G) visou fornecer melhorias de desempenho, além de reduzir o custo por *bit*, o que possibilita uma maior disseminação de serviços móveis. A ITU (*International Telecommunications Union*) define a quarta geração dentro do padrão IMT-Advanced [2.3] como uma rede essencialmente de banda larga, baseada totalmente no protocolo IP, suportando taxas de dados nominais de 100 Mbps, quando o usuário estiver em movimento e 1 Gbps, quando o usuário estiver parado.

Em outubro de 2010, a ITU anunciou oficialmente que o LTE-Advanced e o WirelessMAN-Advanced, parte do Wimax IEEE 802.16m, como tecnologias IMT-Advanced (4G) [2.4].

Ilustra-se na Figura 2.1, a evolução dos sistemas celulares através de suas gerações que utilizam comunicação de dados, portanto as tecnologias anteriores a 2G não entram neste escopo.

Figura 2.1: Evolução dos sistemas celulares através de suas gerações [2.5].



A ITU definiu em Junho de 2015 o calendário geral que será utilizado para o desenvolvimento da tecnologia 5G. No momento por ser uma tecnologia emergente e não geradora de tráfego, não abordaremos o 5G. Maiores detalhes sobre o 5G o leitor poderá encontrar na referência [2.13].

2.1.4. Distribuição Geográfica

Os sistemas digitais permitem a integração e intercomunicação de redes locais WLAN (*Wireless Local Area Network*), as metropolitanas WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*) e as de longa distância WWAN (*Wireless Wide Area Network*) [2.6].

A tecnologia Wi-Fi (padrão IEEE 802.11)[2.7] faz parte das redes locais WLAN [2.6], sendo ela uma importante opção de conexão em áreas de negócio, como, por exemplo, nos ambientes corporativos, aeroportos, hotéis, livrarias, restaurantes e residências. Esta tecnologia possui custo baixo de implantação o que a torna economicamente acessível aos usuários e é um diferencial para os estabelecimentos que a oferecem aos seus clientes. O Wi-Fi permite o usuário dispor de uma mobilidade restrita, a partir de uma base que se conecta a Internet pela rede fixa, portanto pode ser considerada como um complemento às tecnologias de acesso com fio.

Ao longo da última década (2000-2010), as redes metropolitanas WMAN [2.6] foram representadas pela tecnologia Wimax (*WorldWide Interoperability for Microwave Access*). O termo Wimax foi criado com o objetivo de promover a compatibilidade e interoperabilidade entre equipamentos baseados nos padrões da série IEEE 802.16 [2.8]. Este padrão é similar ao padrão Wi-Fi (IEEE 802.11) [2.7], que já é bastante difundido, porém agrega conhecimentos e recursos mais recentes, visando a um melhor desempenho de comunicação. O padrão Wimax estabelece a parte final da infra-estrutura de conexão de banda larga (*last mile*), oferecendo conectividade para uso doméstico, empresarial e em *hotspots*.

A rede de longa distância sem-fio WWAN [2.6] é uma tecnologia que as operadoras de celulares utilizam para criar a sua rede de transmissão. Esta é representada pelas famílias CDMA, GSM/3G/HSPA/LTE/LTE-A [2.10] de comunicações móveis, que começaram com foco na telefonia (serviço de voz) e foram gradualmente incorporando funcionalidades para o acesso a rede de dados e ao aumento da banda disponível. A arquitetura GSM possui interfaces abertas e padronizadas, para ser o mais abrangente possível. Sua estrutura viabiliza a integração entre componentes de diferentes fabricantes, tornando-se assim extremamente flexível, além de aquecer a concorrência e diminuir o preço para o usuário, portanto mais viável.

Na próxima seção será apresentado o cenário tecnológico atual, enfatizando suas vantagens quanto a uma expressiva melhoria na transmissão de dados pelas redes 4G e também a tecnologia VoLTE, nome dado as chamadas de voz totalmente IP.

2.2. Cenário tecnológico atual

No atual cenário dos fabricantes de celulares, juntamente com suas operadoras, o que mais se discute é o impacto da tecnologia *LTE-Advanced* (LTE-A) no mercado de telecomunicações e também a implantação da tecnologia VoLTE nas redes 4G LTE totalmente IP. Assim inicia-se uma nova concorrência para conseguir ter a dominância de mercado, englobando os fabricantes de dispositivos, o desenvolvimento de novos aplicativos e a implantação destas tecnologias pelas operadoras.

Desde 2015 os fabricantes de celulares estão implantando o LTE-A nos seus produtos titulados 4G. Algumas operadoras já se adaptaram ao novo padrão e outras estão se adaptando para oferecer melhores serviços. A tecnologia VoLTE está implantada nas redes dos países da Europa, América do Norte, Ásia e em fase de implantação nos países da América Central e América do Sul, incluindo o Brasil.

Nas próximas seções serão apresentados os objetivos e as metas das tecnologias LTE-Advanced e o VoLTE.

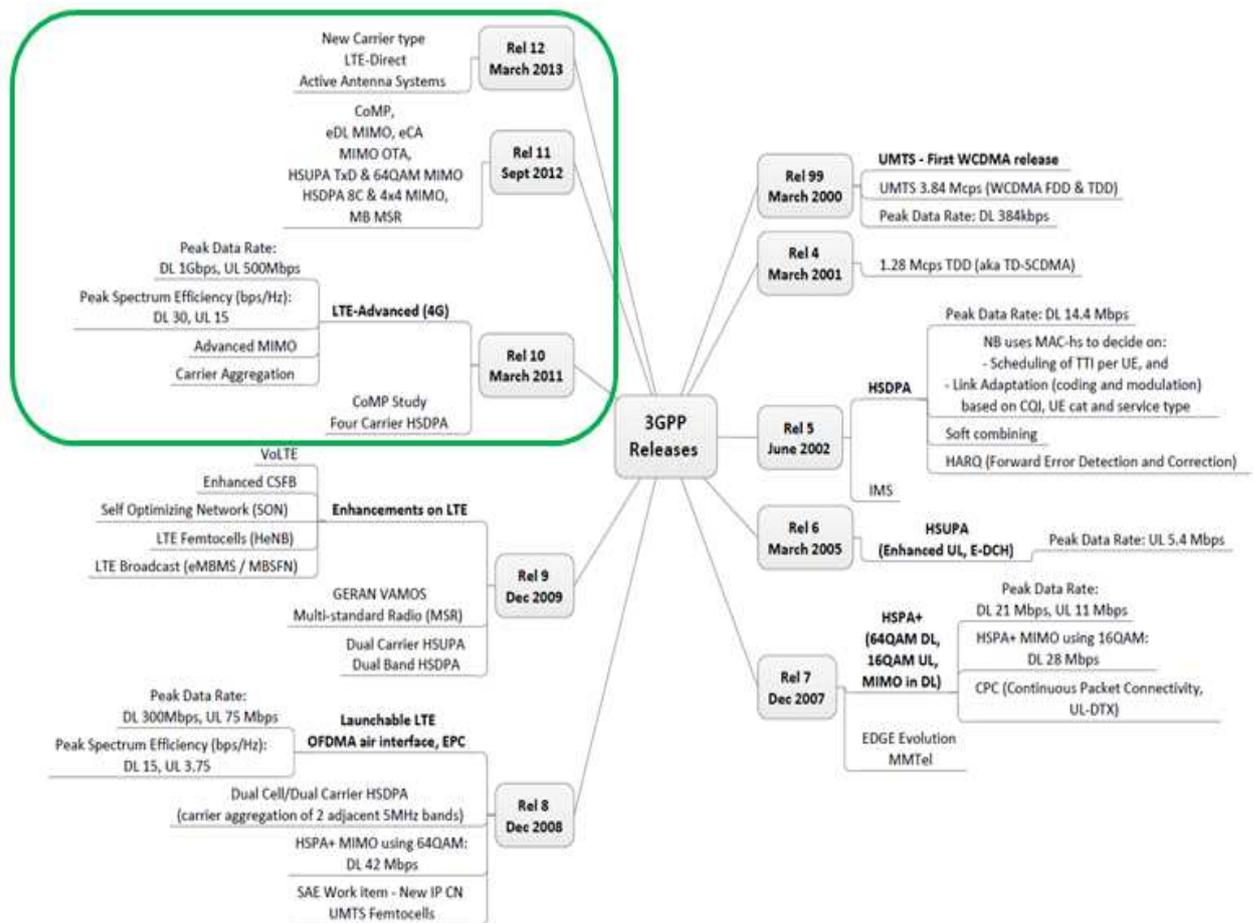
2.2.1. LTE Advanced

O LTE-Advanced tem como principal objetivo oferecer taxas de *bits* (*bitrates*) mais elevadas de uma forma economicamente eficiente e que atenda aos requisitos do IMT-Advanced.

Até hoje, em termos do aumento na taxa de transmissão de dados para as redes sem fio, a tecnologia LTE-A desenvolvida pelo 3GPP representa o melhor resultado, mas ainda está muito distante das taxas oferecidas pelas redes ópticas. O LTE-A será discutido em detalhes neste capítulo a fim de mostrar que mesmo tendo significativos aumentos na taxa de transmissão de dados é importante que as redes sem fio estejam aliadas às redes ópticas para aumentar a capacidade e melhorar a vazão (*throughput*) de dados gerados pelos seus usuários conectados.

Na Figura 2.2 ilustra-se o mapeamento das versões (*releases*) 3GPP, realizado no R&D da empresa LG Electronics do Brasil. É importante notar que um dos requisitos específicos do 3GPP é a compatibilidade com as versões anteriores. Outra característica comum entre os *releases* é o aumento da capacidade de transmissão de dados.

Figura 2.2: Versões 3GPP



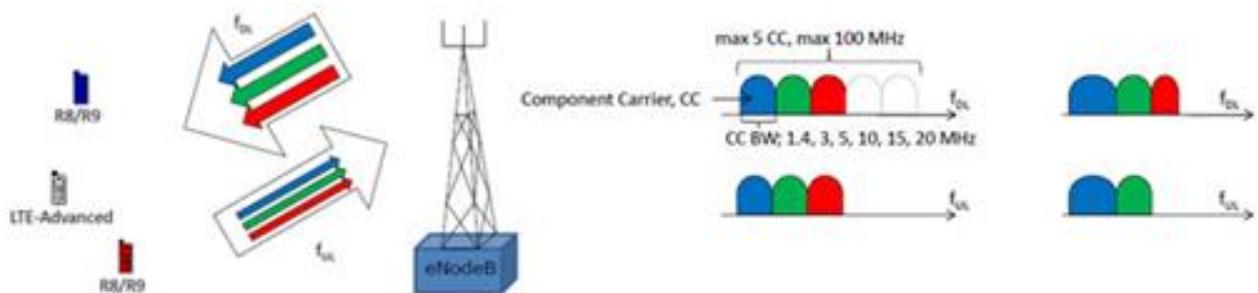
O LTE-A é representado pela versão Rel.10 e está em destaque na Figura 2.1. Na versão Rel.10, o 3GPP estabelece a utilização de diferentes portadoras de frequências, podendo ter frequências contínuas ou não, para atingir especificação exigida pelo IMT-Advanced para o pico da taxa de transmissão de dados. Portanto, foi possível atingir pico de taxa de transmissão de dados de 1 Gbps para DL (*downlink*), 500 Mbps para UL (*uplink*) e uma eficiência espectral pico de 30 bps/Hz para DL e 25 bps/Hz para UL. A Tabela 2.1 ilustra este aumento oferecido pelo LTE-A em comparação ao LTE e ao IMT-Advanced [2.10].

Tabela 2.1: Metas de desempenho do LTE, IMT Advanced e LTE Advanced [2.10]

		Rel. 8 LTE	IMT-Advanced	Rel. 10 LTE-Advanced
Pico de taxa de transmissão de dados	DL	300 Mbps	--	1 Gbps
	UL	75 Mbps	--	500 Mbps
Eficiência espectral pico [bps/Hz]	DL	15	15	30
	UL	3.75	6.75	15

A agregação de portadora (*Carrier Agregacion - CA*) permite utilizar diferentes faixas de frequência de maneira combinada para estender a taxa de transmissão de dados de DL (*Downlink*), de UL (*Uplink*) e mantendo a compatibilidade com LTE Rel. 8. O LTE-A suporta a agregação de até 5 componente da portadora, tendo cada um taxa de transmissão que varia de 1,4 MHz à 20 MHz, resultando em uma taxa de transmissão máxima agregada de 100 MHz (5×20 MHz), ilustrada na Figura 2.3 [2.12].

Figura 2.3: Agregação de portadora – FDD; a R10 pode alocar recursos DL e UL em até cinco componentes da portadora (CC) [2.12].



Esta técnica pode ser aplicada em ambos os sistemas TDD (*Time Division Duplex*) e FDD (*Frequency Division Duplex*). Em sistemas FDD, o número de componentes de suporte UL é sempre menor do que o número de DL, ao passo que no TDD cada componentes da portadora utiliza a mesma configuração, tanto para o DL quanto para o UL. As frequências de transmissão do LTE estão ilustradas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Frequências de transmissão do LTE suportadas FDD e TDD[2.15]

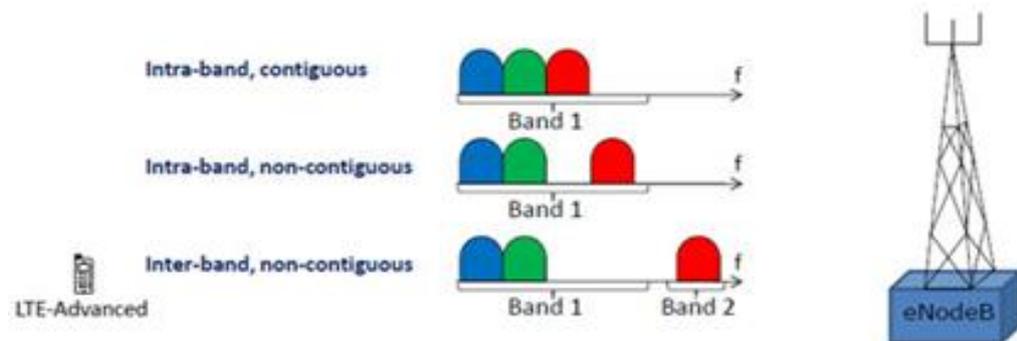
Banda E-UTRA	Uplink (MHz)	Downlink (MHz)	Regiões
1	De 1920 a 1980	De 2110 a 2170	Ásia, Europa e Japão
2	De 1850 a 1910	De 1930 a 1.990	América Latina, Canadá e EUA
3	De 1710 a 1785	De 1805 a 1880	Finlândia, Hong Kong, Alemanha
4	De 1710 a 1755	De 2110 a 2155	América Latina, Canadá e EUA
5	De 824 a 849	De 869 a 894	Canadá, Austrália, EUA, Chile
6	De 830 a 840	De 875 a 885	Japão
7	De 2500 a 2570	De 2620 a 2690	Asia, Europa
8	De 880 a 915	De 925 a 960	Europa, América Latina
9	De 1749,9 a 1784,9	De 1844,9 a 1879,9	Canadá, EUA e Japão
10	De 1710 a 1770	De 2110 a 2170	Brasil, Ecuador, Peru e Uruguai
11	De 1427,9 a 1447,9	De 1475,9 a 1495,9	Japão
12	De 699 a 716	De 729 a 746	EUA
13	De 777 a 787	De 746 a 756	EUA
14	De 788 a 798	De 758 a 768	EUA
17	De 704 a 716	De 734 a 746	EUA
18	De 815 a 830	De 860 a 875	Japão
19	De 830 a 845	De 860 a 875	Japão
20	De 832 a 862	De 791 a 821	Europa
21	De 1447,9 a 1462,9	De 1495,9 a 1510,9	Japão
22	De 3410 a 3490	De 3510 a 3590	
23	De 2000 a 2020	De 2180 a 2200	EUA
24	De 1626,5 a 1660,5	De 1525 a 1559	EUA
25	De 1850 a 1915	De 1930 a 1995	EUA
26	De 814 a 849	De 859 a 894	EUA
27	De 807 a 824	De 852 a 869	

28	De 703 a 748	De 758 a 803	Austrália, Brasil, Chile, Japão, México, Nova Zelândia e Uruguai
29	N/A	De 717 a 728	EUA
...			
33	De 1900 a 1920		Ásia (menos no Japão), Europa
34	De 2010 a 2025		Ásia, Europa
35	De 1850 a 1910		Américas
36	De 1930 a 1990		Américas
37	De 1910 a 1930		
38	De 2570 a 2620		Europa
39	De 1880 a 1920		China
40	De 2300 a 2400		China e Índia
41	De 2496 a 2690		EUA
42	De 3400 a 3600		
43	De 3600 a 3800		
44	De 703 a 803		

Ainda sobre a agregação portadora, esta pode ter três cenários de agregação, como ilustra-se na Figura 2.4 [2.12]:

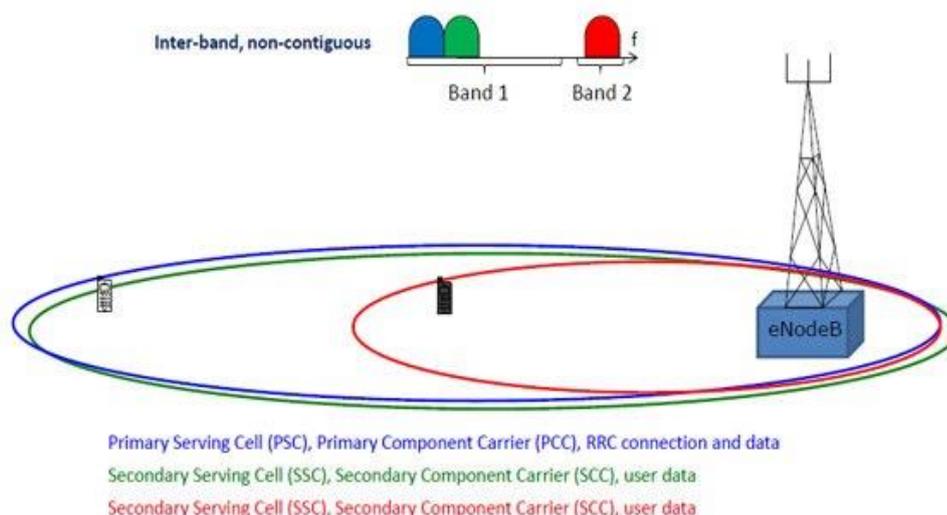
- ✓ Na agregação intra-banda contínua, os componentes da portadora estão de forma contínua, situada na mesma banda de operação;
- ✓ Na agregação intra-banda não-contínua, os componentes de suporte estão localizados dentro da mesma banda de operação, mas de forma não contínua.
- ✓ Na agregação inter-banda, os componentes estão localizados em diferentes bandas de operação.

Figura 2.4: Diferentes cenários de CA [2.12]



No caso da atribuição não contínua, a agregação de portadora pode ser impossibilitada como ilustra-se a agregação inter-banda na Figura 2.5 [2.12]. A agregação da portadora para os três componentes da portadora, apenas é possível para o equipamento do usuário (UE) na cor preta pois está dentro da cobertura da portadora representada pelo área circulado em vermelha, em verde e em azul. O equipamento do usuário (UE) na cor branca não está dentro da área de cobertura da portadora representada pela área circulado em vermelho, portanto não é possível ter agregação de portadora não contínua com esta portadora.

Figura 2.5: Agregação de portadora inter-banda [2.12]



A Agregação de Portadora é o ponto chave, embora tenham outros elementos como Multiponto Coordenado (*Coordinated Multi-Point -CoMP*), Redes Auto-Otimizadas (*Self-Optimizing Networks - SON*), aprimoramentos para células pequenas, Coordenação Avançada para Interferência Entre Células (*Enhanced Inter-Cell*

Interference Coordination - eICIC) e a tecnologia de antenas *Multi-Input Multi-Output* (MIMO) para melhorar o desempenho e a capacidade da rede, que também contribuíram para o LTE-A ter atingido suas metas.

2.2.1. Voz sobre LTE (VoLTE)

A tecnologia Voz sobre LTE (VoLTE) nativa da quarta geração (4G) é representada pela versão Rel.9 e tem como principal objetivo entregar serviços de multimídia de alta qualidades, serviços interativos em tempo real, tais como vídeo e voz [2.17]. O suporte para as aplicações sensíveis ao atraso, como por exemplo voz, exige garantia de qualidade de serviço (QoS) para o usuário final.

O sistema LTE tem a habilidade de controlar o QoS no nível de fluxo de serviço. Existem diferentes fluxos de serviço sendo eles o fluxo de serviço padrão e o fluxo de serviço dedicado. Estes fluxos ainda podem ser classificados como GBR (*Guaranteed Bit Rate*) e non-GBR (*non-Guaranteed Bit Rate*). Maiores detalhes sobre a classificação dos fluxos o leitor poderá encontrar na referência [2.16]. Normalmente vários serviços estão sendo executados em paralelo em um equipamento do usuário (UE) como por exemplo, *streaming* de vídeos, sinalização SIP (*Session Initiation Protocol*) e uma chamada VoLTE em andamento. Para cada serviço tem-se diferentes requisitos de QoS, portanto, para gerenciá-los, a rede 4G LTE atribui um parâmetro de QCI (*QoS Class Identifier*).

O parâmetro QCI define a classe de QoS associada a um fluxo de serviço. Para cada valor de QCI são definidas as seguintes características: tipo de recurso, nível de prioridade, atraso - PDB (*Packet Delay Budget*) e taxa de perda de pacotes - PELR (*Packet Error Loss Rate*). São nove os valores de QCI definidos pelo 3GPP, ilustrado na Tabela 2.3 [2.16]. Fluxos de serviço de voz, vídeo, mensagens e transferência de arquivos apresentam diferentes características e são associados a diferentes QCI.

Os QCIs são padronizados para garantir que aplicações e serviços mapeados em determinados QCIs recebam o mesmo nível de QoS mínimo em implantações

compostas por redes com vários fornecedores, bem como no caso do *roaming* que envolve diferentes redes na prestação do serviço.

Tabela 2.3: Características padronizadas de QCI [2.16]

QCI	Tipo de recurso	Prioridade	PDB (ms)	PELR	Serviços (exemplos)
1	GBR	2	100	10^{-2}	Voz conversacional
2	GBR	4	150	10^{-3}	Vídeo conversacional (transmissão ao vivo)
3	GBR	3	50	10^{-3}	Jogos em tempo real
4	GBR	5	300	10^{-6}	Vídeo não conversacional
5	No-GBR	1	100	10^{-6}	Sinalização IMS
6	No-GBR	6	300	10^{-6}	Vídeo (transmissão armazenada) Serviços baseados em TCP
7	No-GBR	7	100	10^{-3}	Voz, Vídeo (transmissão ao vivo) Jogos interativos
8	No-GBR	8	300	10^{-6}	Vídeo (transmissão armazenada) Serviços baseados em TCP
9	No-GBR	9	300	10^{-6}	Vídeo (transmissão armazenada) Serviços baseados em TCP

O limite máximo de atraso fim a fim é estabelecido em 300 ms pela recomendação ITU G.114 [2.18], qualquer valor acima torna a qualidade de transmissão inaceitável. O limite de conforto é estabelecido em 150 ms.

2.3. Comentários

Neste capítulo, descreveu-se a evolução de simples sistemas analógicos de telefonia para sistemas digitais complexos multi-serviços, agregando redes móveis de dados e acesso à Internet.

Conforme mencionado anteriormente, a tecnologia 5G não tem impacto sobre o presente trabalho, pois ainda está em desenvolvimento. O seu calendário de desenvolvimento geral foi definido pelo ITU em Junho de 2015. A tecnologia 5G revolucionará a natureza de tráfego móvel, oferecendo velocidade de conexão quase instantânea, e de alta confiabilidade. Espera-se que em 2020 a tecnologia móvel 5G permita uma sociedade perfeitamente conectada, reunindo as pessoas, juntamente com os objetos/"coisas", os dados, aplicações, sistemas de transporte e cidades em um ambiente de comunicações em rede inteligente. [2.13] [2.14]

Surge nesse cenário um enorme incremento de demanda de banda para o tráfego *wireless*, cujo agregado hoje está sendo atendido por interconexões ópticas nas redes tronco (*backbones*). Veremos nos próximos capítulos a transposição e a transmissão (transparente) de pacotes eletrônicos das redes clientes (ênfase *wireless*) em pacotes ópticos com chaveamento fotônico.

Referências

- [2.1] WIRELESSBR – “Histórico do sistema móvel celular”, disponível em:
<http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/> (Janeiro de 2015).
- [2.2] LIMA JUNIOR, A.W. *Telecomunicações modernas*, 2ª ed. Rio de Janeiro: Book Espress, 2001.
- [2.3] ITU – “IMT-Advanced”, disponível : http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/ (Fevereiro 2015).
- [2.4] ITU - “IMT Advanced”, disponível em
http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/ (Fevereiro de 2015).
- [2.5] TELECOBR – “Gerações de sistemas celulares”, disponível em:
<http://www.teleco.com.br/tecnocel.asp> (Fevereiro de 2015).
- [2.6] TELECOBR – “WLAN, WMAN, WWAN”, disponível em:
<http://www.teleco.com.br/tutoriais/> (Fevereiro de 2015).
- [2.7] IEEE – “Padrão IEEE 802.11”, disponível em:
<http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.11-2012.html> (Fevereiro de 2015).
- [2.8] IEEE – “The world's largest professional association for the advancement of technology”, disponível em: <http://www.ieee.org/index.html> (Fevereiro de 2015)
- [2.9] IEEE – “Padrão IEEE 802.16”, disponível em:
<http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.16-2001.html>, (Fevereiro de 2015).
- [2.10] H. Holma, A. Toskala, *LTE for UMTS - Evolution to LTE-Advanced*, Wiley; (April 25, 2011).
- [2.11] WIRELESSTELECOM – “LTE Advanced deployments”, disponível em:
<https://wirelesstelecom.wordpress.com/tag/lte-advanced/> (Fevereiro de 2015).
- [2.12] 3GPP – “LTE Advanced”, disponível: <http://www.3gpp.org/technologies/> (Fevereiro 2015).
- [2.13] ITU – “5G”, disponível: http://www.itu.int/net/itu_search/ (Julho 2015).

[2.14] QUALCOMM. “Qualcomm’s 5G vision”, disponível em:

<https://www.qualcomm.com/documents/qualcomm-5g-vision-presentation/> (July 2015).

[2.15] 3GPP TS 36.101. “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception - Release 11”, disponível em:

http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136101/11.08.00_60/ts_136101v110800p.pdf (Julho 2015)

[2.16] R. Takaki, J. J. Bazzo, F. M. F. Rocha, J. Seki “Análise de desempenho do serviço de voz no sistema LTE para diferentes condições de recepção na célula”, Cad. CPqD Tecnologia, Campinas, SP, v.9, n.2, p.63-74, jul. /dez. 2013.

[2.17] R. Takaki, J. J. Bazzo, “Voz para a rede LTE”, Cad. CPqD Tecnologia, Campinas, SP, v.8, n.2, p.27-32, jul. /dez. 2012.

[2.18] ITU – “G.114 ITU-T one-way transmission time aspect of transmission quality”, disponível em: <https://www.itu.int/> (Janeiro de 2016).

3. Transporte Óptico Metropolitano

Este capítulo tem como propósito fazer uma revisão do estado da arte de redes ópticas metropolitanas, os seus protocolos de roteamento e os métodos de transporte. O cenário em estudo são regiões não estritamente urbanas, mas regiões urbanizadas estendidas e com alta demanda de tráfego. Este capítulo baseia-se em conceitos e definições das referências: [3.5] [3.6] [3.7].

3.1. Redes Ópticas

A evolução das redes ópticas se deu juntamente com a evolução de cada dispositivo que constitui os sistemas ópticos, tais como lasers, moduladores, amplificadores, repetidores, transmissores, receptores, fibras, roteadores, conectores, filtros e outros que, com seu funcionamento em conjunto, permitiram que a capacidade dos enlaces oferecessem desde dezenas de Mbps a dezenas de Gbps ainda nos anos 90 e atingindo hoje, nas redes de tronco metropolitanas (e longa distância), taxas de agregado superando Tbps. [3.8]

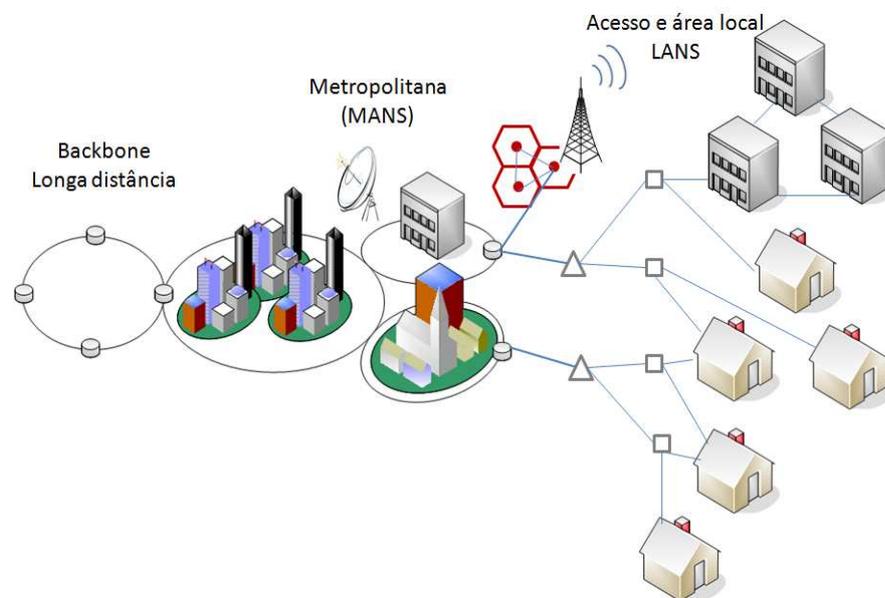
Por outro lado, nas redes de metro-acesso, próximas ao usuário final, as taxas de transmissão atingem em torno de centenas de Mbps, chegando até Gbps. As operadoras de telecomunicações, por sua vez, têm mostrado um grande interesse em fornecer aos clientes diversos serviços que requerem banda larga, dentre eles um serviço denominado “triple-play”, ou seja, vídeo, voz e dados na mesma rede. Portanto, a utilização de sistemas ópticos é uma boa solução [3.9].

As redes metropolitanas são redes intermediárias, abrangendo tanto o nível de acesso quanto o de distribuição nas redes metropolitanas tronco (*backbone*), em que os tráfegos de distribuição e o de acesso são agregados antes de passarem ao nível interurbano. Uma rede metropolitana precisa fornecer qualidade de serviço, pois em

um ambiente altamente dinâmico em que existe a granularidade de tráfego impactando a banda ocupada de cada serviço, o custo por *bit* tende a ser dominante.

Apresenta-se na Figura 3.1 [3.5] uma visão geral da arquitetura de uma Rede Óptica nos três níveis de interconexão, representada por uma rede de núcleo circundada de diversas conexões com as redes metropolitanas e estas, por sua vez, conectando as redes de acesso, possibilitando o acesso do usuário a essa massa de redes de telecomunicações.

Figura 3.1: Redes Tronco (Longa Distância), Metropolitana e Acesso [3.5]

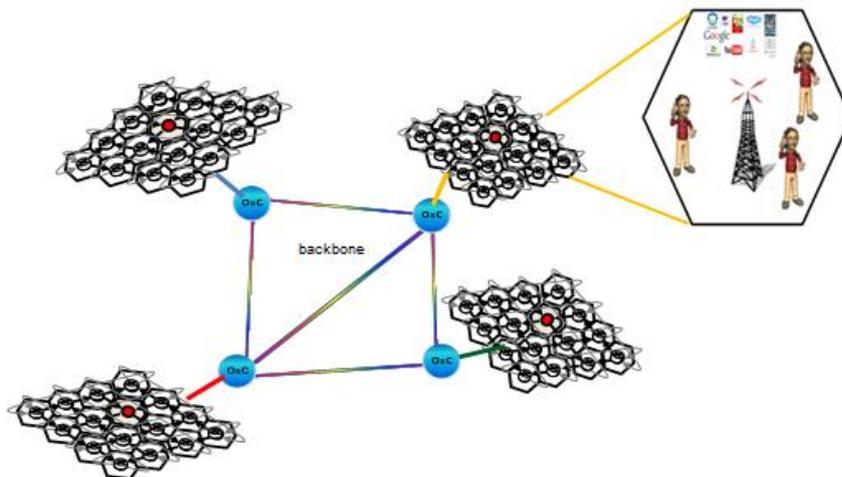


As redes ópticas oferecem largura de banda suficiente e confiabilidade para comporem o cenário atual e futuro das redes de comunicação. Entretanto, grande parte da infra-estrutura da rede de transporte óptica instalada emprega a Hierarquia Digital Síncrona (SDH), adequada para a transmissão de voz, utilizando a comutação por circuito, agregada à tecnologia WDM [3.2] [3.9], que são aplicadas nas redes metropolitanas, visando aumentar a capacidade de transporte através da multiplexação dos sinais ópticos.

O objetivo do WDM é o de utilizar numa mesma fibra óptica o transporte simultâneo de múltiplos sinais com diferentes comprimentos de onda. Sua elevada

flexibilidade para transportar diferentes tipos de hierarquias digitais, permite oferecer interfaces compatíveis com as diversas aplicações existentes, entre elas as redes de transmissão PDH e SDH/SONET [3.11], as redes Multi serviços ATM, IP e *Frame Relay*, a interligação de Centrais Telefônicas para serviços de voz tradicional local (comutação de circuitos - OCS), a interligação de elementos de redes “*Cross-connect*” em redes de transporte metro com proteção automática e as aplicações específicas para redes de dados e de computadores de grande porte tais como *Fast Ethernet*, *Gbit Ethernet*, interfaces ESCON, FICON e *Fiber-Channel*, entre outras. Ilustra-se na Figura 3.2 o diagrama de uma rede WDM com suas redes de acesso e aplicações que podem transportar.

Figura 3.2: Redes WDM e Metro-Acesso com aplicações

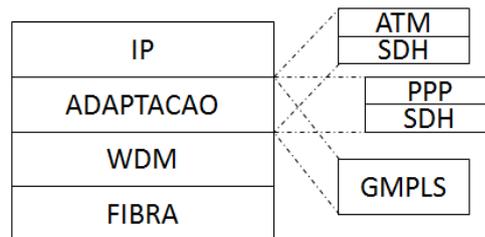


Para suprir a crescente demanda por banda passante nas redes de telecomunicações, principalmente devido às múltiplas aplicações tipo Internet (IP), a tendência é de que o tráfego nas redes ópticas seja crescente em datagramas IP, inserindo assim tráfego IP nas redes ópticas utilizando o WDM (*IP over WDM*). Para realizar o IP sobre WDM é necessária uma camada de adaptação, conforme é ilustrado na Figura 3.3. Essa camada pode ser ATM/SDH (*Asynchronous Transfer Mode/ Synchronous Digital Hierarchy*), SDH usando protocolo PPP/HDLC, ou outros [3.10]. Mas na atualidade, o modelo mais eficiente é o de utilizar protocolos GMPLS,

que oferece maior flexibilidade e melhor capacidade de engenharia de tráfego e diminui custos de gerenciamento.

O protocolo GMPLS (*Multiprotocol Label Switching*) é utilizado para criar e gerenciar caminhos entre o nó origem e o nó destino dentro da rede óptica [3.10].

Figura 3.3: IP sobre WDM. [3.9]



Quanto à forma de comutação dos dados dentro da rede óptica, elas podem ser de 3 tipos: redes de comutação de circuito (*OCS – Optical Circuit Switch*), redes de chaveamento de pacotes ópticos (*OPS – Optical Packet Switching*) e redes de comutação de rajadas ópticas (*OBS – Optical Burst Switching*) [3.1] [3.2]. Nas próximas seções deste capítulo serão apresentadas teorias e definições direcionadas ao estudo de redes OPS/OBS.

É importante ressaltar que nossa proposta de conexão de redes sem fio e redes ópticas é justamente a interface dos pacotes de informação e sinalização gerados na rede sem fio (origem/cliente) sendo eles diretamente transformados em pacotes ópticos, roteados na rede óptica e entregues na rede sem fio destino. A partir dessas premissas consideraremos adiante apenas os pacotes e rajadas ópticas.

3.2. Comutação de Pacotes Ópticos – OPS

A comutação de pacotes ópticos é uma estratégia de roteamento mais simples, em que se lêem as informações de controle transmitidas juntamente com os dados para tomar a decisão de comutação. Neste caso, os pacotes com cabeçalho e carga útil são montados diretamente no domínio óptico e roteados nos nós da rede óptica

(OPSN), sem necessidade de conversão opto-elétrico (OE) [3.13]. A estrutura do nó será detalhada na seção 4.3.

Os nós ópticos são constituídos por quatro partes: a interface de entrada, o módulo de chaveamento, a interface de saída e a unidade de controle [3.1]. A interface de entrada é principalmente utilizada para a delimitação e o alinhamento de pacotes, a extração de informação do cabeçalho do pacote e a retirada deste cabeçalho. O módulo de chaveamento é o coração do nó e é usado para o roteamento óptico dos pacotes. A interface de saída é usada para regenerar os sinais ópticos e inserir o cabeçalho. A unidade de controle, controla o roteamento dos pacotes, baseada nas informações de cabeçalho. As matrizes de roteamento, definidas a partir de um dado protocolo de roteamento, são armazenadas na unidade de controle e são importantes para uma tomada de decisão do melhor caminho a serem direcionados os pacotes.

Quando um pacote chega a um nó óptico, primeiramente, este é processado pela interface de entrada que é responsável por separar o cabeçalho e a carga útil (*payload*). O cabeçalho é convertido para o domínio elétrico e é processado eletronicamente pela unidade de controle. A carga útil ou *payload* permanece como um sinal óptico durante todo o processo, e só será aberto ou desmontado nos nós de bordas ou em seu destino final. Depois que o *payload* passa pelo módulo de roteamento, o cabeçalho é montado antes de ter sido reconvertido em óptico pela interface de saída [3.13].

Os protocolos de roteamento são ingredientes essenciais para o bom funcionamento do tráfego de uma rede e considerados o aspecto mais complexo e crítico no projeto de rede Internet. Os roteamentos escolhidos para serem aplicados neste trabalho adotam a política do caminho mínimo fim a fim para cada aplicação da rede, ou seja, o pacote tem como meta sempre realizar o menor caminho para chegar ao seu nó destino. O estabelecimento do caminho óptico é definido por meio da utilização de alguns algoritmos como protocolos de roteamento, os quais podem ser estáticos ou dinâmicos, dependendo do tipo de aplicação. [3.9][3.12]

O roteamento estático sempre escolhe o mesmo caminho para cada nó de origem destino. Este caminho é estabelecido conforme uma rota pré-determinada. Se todos os recursos como total de banda, armazenadores e comprimentos de ondas disponíveis ao longo de determinado caminho óptico estiverem sendo utilizados ou estiverem alocados para o transporte de outras aplicações, as perdas destes pacotes podem ocorrer devido à falta de recursos disponíveis. Outro problema do roteamento fixo é que este, por si só, não é tolerante à falhas e portanto, um esquema de roteamento alternativo deve ser implantado dinamicamente em caso de necessidade de implementação de um sistema de proteção quanto à falhas. [3.9][3.4]

Ainda no roteamento estático, como dito anteriormente, a escolha do caminho é feita através de rotas previamente estabelecidas (orientadas a conexão), proporcionando um melhor planejamento da disponibilidade de rotas na rede. No entanto, este tipo de roteamento tem limitações para rotear tráfego aleatório.

O roteamento dinâmico altera as decisões de roteamento para refletir as mudanças na topologia e normalmente, também no tráfego. Os algoritmos de roteamento dinâmico diferem em termos do lugar em que obtêm suas informações, podendo ter o conhecimento total ou parcial da rede, do momento em que alteram as rotas e da métrica utilizada na otimização, como por exemplo a distância, o número de saltos, o tempo estimado de tráfego [3.14]

3.3. Comutação de Rajadas Ópticas – OBS

Nas redes OBS, temos dois modos de operação. O primeiro pode-se ter agregação de vários clientes para o mesmo destino. O segundo, os pacotes de um mesmo cliente e com o mesmo endereço de destino são agregados em rajadas. Em ambos os casos, são agregados pelos nós de origem, antes de serem transmitidos. Pode-se ter também dois modos de controle, o centralizado e o distribuído. No processo centralizado, há reserva do canal que deve ser rápido, com ou sem confirmação, por meio do envio de um pacote de controle da rajada (“BCP – *Burst*

Control Packet”). No processo distribuído, o próprio cabeçalho da rajada vai estabelecendo o caminho. No caso de o canal ter sido estabelecido com sucesso, depois da rajada ter sido completamente enviada, ele é liberado.

A premissa da rede OBS é habilitar e desabilitar dinamicamente rotas para o tráfego da rajada, da mesma forma para o de comutação por circuito, mas por um período curto, necessário para a transmissão da rajada [3.2]. As rajadas que trafegarão pela rede OBS são oriundas de rede de grande flutuação de tráfego, como as redes metropolitanas.

3.4. Protocolos de Roteamento

No presente trabalho foram utilizados dois tipos de protocolos de roteamento: *Store and Forward-SF* e o *Deflection Routing-DR* na obtenção dos resultados analíticos e de simulação computacional.

3.4.1. *Store and Forward (SF)*

Nas redes de pacotes convencionais, o armazenamento de pacotes eletrônicos nos nós intermediários é proporcionado usualmente por um roteamento do tipo guardar e encaminhar (*store and forward*), onde um pacote só é encaminhado à sua porta preferencial, se esta estiver disponível. No caso de ela já estar sendo ocupada por outro pacote, este entraria em contenda e seria guardado em um armazenador e só depois, encaminhado. Neste tipo de roteamento preserva-se o caminho mínimo; o pacote sempre percorrerá o menor caminho que existe entre seu nó de origem até seu nó destino, sendo o seu caminho definido no nó de origem. Caso algumas das rotas entre o caminho que o pacote irá percorrer estejam ocupadas por outro pacote, este ficará armazenado em um *buffer* até que seu caminho preferencial esteja desocupado. Este roteamento é utilizado para verificar a melhor opção de rota, visto que, neste caso, é desconsiderada a resolução de contenda.

Esta abordagem não pode ser implementada de maneira simples em redes de pacotes ópticos utilizando apenas fibras de retardo. Deste modo, o esquema de roteamento por deflexão (DR) representa uma solução atraente, possibilitando a implementação de uma rede de pacotes ópticos sem armazenadores e com critérios de resolução de contenda. [3.5]

3.4.2. Deflection Routing (DR)

O outro tipo de roteamento utilizado e que é uma boa solução para resolução de contenda, é o roteamento por deflexão – DR.

O pacote, quando entra no nó de origem, pode ser enviado para a porta preferencial, ou seja, a porta que o leva ao menor caminho até seu destino. Caso esta porta esteja ocupada, este pacote será defletido para a outra porta do nó. Neste caso, os pacotes nem sempre percorrem o menor caminho entre o nó de origem até o nó destino. O nó óptico tem configuração (PxP) sendo P o número de entradas e saídas que deve ser maior ou igual a 2, ou seja, é normalmente constituído por duas ou mais portas de entrada e de saída.

O roteamento por deflexão também conhecido como batata quente (em inglês *Hot Potato*) tornou-se uma técnica atrativa em questões de resolução de contenda, pois dispensa a utilização de *buffers* e de protocolos de sinalizações, reduzindo assim os custos destas redes. Algumas das suas propriedades atraentes são:

- Simplicidade dos nós: o roteamento implementado em cada um dos nós da rede é bastante simples. Primeiro, cada nó deve rotear os pacotes que chegam, para o caminho mais curto. Para que o nó encaminhe o pacote para a porta que o levará pelo caminho mais curto ao seu destino final, basta que este nó faça uma pesquisa em uma tabela de roteamento. A ausência de *buffers* para realizar o DR, livra os nós de terem que realizar tarefas complexas de gerenciamento de *buffers*. Nenhum pacote é perdido devido à falta de capacidade do *buffer*;

- Congestionamento da rede: caso um trecho da rede apresente-se congestionado, os pacotes serão automaticamente defletidos para outro caminho, aliviando assim o tráfego nos locais congestionados e evitando as perdas de pacotes;
- Tolerância à falhas: com rotas alternativas as redes tornam-se mais robustas.

A resolução de contenda espacial é resolvida com este roteamento. Os pacotes que sofrerem disputas e não vencerem, não são descartados e sim defletidos para as portas de saída disponíveis. Neste contexto, devem ser levados em consideração três parâmetros importantes: o atraso de pacotes entre a fonte e o destino final, a ordem da chegada dos pacotes, o tempo de vida máximo que um pacote possa ter (*Time to live -TTL*). [3.5]

3.5. Resolução de contendas

A resolução de contenda pode ocorrer em redes OPS, quando dois ou mais pacotes tentam deixar um nó, utilizando a mesma porta de saída no mesmo comprimento de onda, se existir mais de um comprimento de onda sendo transportado ao mesmo tempo. A contenda pode ser solucionada, utilizando-se artifícios referentes ao tempo, espaço ou comprimento de onda. Mais precisamente, a contenda pode ser resolvida em OPS, usando armazenadores (dimensão de tempo como usado no SF), conversão de comprimento de onda (dimensão de comprimento de onda), e ou roteamento por deflexão (dimensão de espaço como usado no DR). Todas estas técnicas podem ser aplicadas juntamente ou separadamente, tendo assim seus respectivos méritos e deficiências.

Armazenamentos ópticos realizados por linhas de retardo (*Fiber Delay Line - FDL*), oferecem quantidades fixas e finitas de atrasos. Para realizar armazenamento óptico de grande capacidade é necessário aplicar uma grande quantidade de FDLs, o que pode causar perdas na qualidade do sinal e, a necessidade de técnicas de reordenamento de pacotes na saída do nó.

O uso do roteamento DR é uma outra abordagem para resolver disputas em redes OPS sem a necessidade de implementação de *hardwares* no nó óptico, e que podem ser feitas facilmente em *software*. Outro fator positivo é que com o DR, a arquitetura do nó óptico pode ser simplificada, não havendo a necessidade de *buffer* na camada óptica. Porém este tipo de roteamento requer mais recursos de redes, maiores atrasos, e há necessidade de um mecanismo de reordenação dos pacotes no nó destino. Além disto, é necessário também a implementação de estratégias no algoritmo roteador para que os pacotes não entrem em *loop*, provocando perdas e atrasos na transmissão dos pacotes. A eficácia do roteamento DR depende fortemente das condições topológicas e de tráfego da rede. [3.5]

Referências

- [3.1] Martin Maier, *Optical Switching Networks*, Cambridge University Press; (February 11, 2008).
- [3.2] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communications Systems*, 3rd. ed., John Wiley, New York, 2002.
- [3.3] Giozza, W. F., Conforti, E., Waldman, H., *Fibras Ópticas: Tecnologia e Projeto de Sistemas*, Makron, McGraw-Hill, 1991.
- [3.4] F. R. Barbosa, “Redes Óticas” – curso de pós-graduação, FEEC – Unicamp – SP, Disponível em: <http://www.dsif.fee.unicamp.br/~rudge/>
- [3.5] I. B. Martins, “Análise de Desempenho e Proteção em Redes Ópticas Convergentes com Chaveamento Fotônico”, Dissertação de Doutorado, FEEC/Unicamp, 2011
- [3.6] F. R. Barbosa, I. B. Martins, Y. Martins e E. Moschim, “Comparative Study of Latency and Throughput in OPS/OBS Metro Access Network”, *Networks’ 2014 – Madeira PT*, Sept 2014.
- [3.7] Y. Martins, F. R. Barbosa, I. B. Martins e E. Moschim, “Influence of Topology Connectivity for Transport in Optical Networks with Amplified Photonic Switches”, Intl. Conf. Transparent Opt. Ntwks - *Icton 2014 – Graz, Austria*, July 2014.
- [3.8] M. Maier, N. Ghazisaidi, and M. Reisslein, *The Audacity of Fiber-Wireless (FiWi) Networks*, Heidelberg, Germany: Springer, "AccessNets: Lecture Notes of the ICST," September. 2009.
- [3.9] R. Ramaswami, K. Sivarajan, *Optical Networks – a practical perspective*, 2nd. Ed., Morgan Kaufman, San Francisco, USA, 2002.
- [3.10] PAPANIMITRIOU, D., E MANNIE, E. *Analysis of Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS)-based Recovery Mechanisms (including Protection and Restoration)*. Internet Draft (April, 2005).
- [3.11] ITU-T Recomendação G.707/Y.1322: *Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH)*.

[3.12] W. Stallings, *High-Speed and Networks: Performance and Quality of Service*, 3rd Ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey

[3.13] D. M. Junior, "Desenvolvimento de Nós de Chaveamento de Pacotes Ópticos para Aplicação em Redes Metropolitanas de Acesso", Dissertação de Mestrado, FEEC/Unicamp, 2005

[3.14] Tanenbaum, A. S.; Wetherall, D., "Redes de Computadores" Prentice Hall, 5a Ed., 2011

4. Definição de parâmetros, conceitos básicos e metodologia

Neste capítulo são definidos os principais parâmetros utilizados nas simulações deste trabalho, a topologia com as suas configurações, os procedimentos e a metodologia para obtenção dos resultados.

4.1. Parâmetros Utilizados para Avaliar o Desempenho das Redes

Para que se possa avaliar o desempenho das redes, alguns parâmetros foram escolhidos e analisados, tais como: número médio de saltos (ANH), números de nós (N), número total de usuários (N_u), capacidade total da rede (C_t), capacidade útil da rede (C_u), carga da rede (L_c), vazão (T_p), atraso médio dos pacotes (A_m) e a fração de perda de pacotes (PLF).

O número médio de saltos ($\bar{H} = ANH$) é definido como o valor médio de saltos que os pacotes realizam para chegarem aos seus endereços de destinos. Seu cálculo é realizado na etapa de roteamento, pois é nesta etapa que é definida a rota de menor caminho disponível em que o pacote pode percorrer e chegar ao seu destino. O cálculo deste parâmetro está relacionado com as métricas do algoritmo do protocolo de roteamento adotado. Neste trabalho adotam-se dois tipos de protocolos de roteamento: Roteamento por Deflexão (*Deflection Routing* - DR) e Roteamento Armazena e Envia (*Store-and-Forward* - SF) os quais já foram definidos e explicados anteriormente. O cálculo do ANH é baseado na matriz de caminho mínimo (C_m) dividida pelo número total de usuários (N_u). A matriz C_m é gerada aplicando o algoritmo *Dijkstra* [4.1] e o N_u é adotado por Acampora [4.7] como fontes tráfego de uma rede, sendo que cada nó da rede gera tráfego uniforme para todos os outros nós

da rede, menos para si mesmo. O N é o número total de nós e o N_u é calculado, utilizando a seguinte equação:

$$N_u = N(N - 1) \quad (1)$$

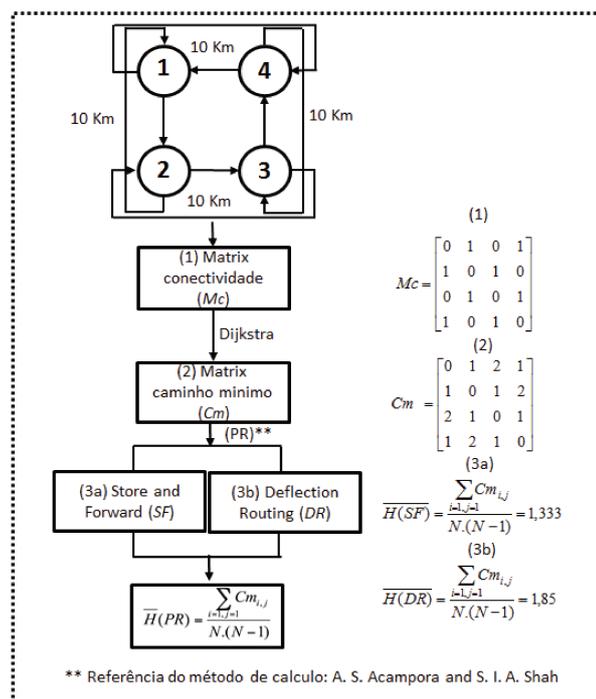
O ANH é calculado com a equação (2) dada por:

$$\bar{H}(PR) = \frac{\sum_{i=1, j=1} C_{mij}}{N_u} \quad (2)$$

onde C_{mij} são os elementos da matriz para o número total de caminhos mínimos em uma dada configuração, o i representa o número de linhas e o j representa o número de colunas.

Nota-se que o ANH está em função do protocolo de roteamento (PR), ou seja, ele irá variar conforme as regras do protocolo.

Figura 4.1: Fluxograma de cálculo do ANH para uma dada topologia [4.6],[4.7].



A capacidade total de uma rede (C_t) é a soma das capacidades separadas de cada enlace. Este modelo tem sido utilizado nos trabalhos [4.7] e [4.8] para redes em malha regulares uniformes de grau k e as ligações com o mesmo tamanho. A capacidade total de uma rede pode ser calculada utilizando a seguinte equação:

$$C_t = \frac{k.N.S}{\bar{H}} \quad (3)$$

onde \bar{H} (igual ANH) é o número médio de saltos para os pacotes ópticos, calculado com a equação (2); N é o número de nós, S é a capacidade de cada enlace em Gbps e k indica o grau do nó óptico, ou seja, o número de portas de entrada e saída.

Nota-se que o C_t é diretamente proporcional a $1/\bar{H}$, o que significa que a C_t é maximizada sempre que o \bar{H} for minimizado. O limite máximo da capacidade da rede é obtido quando o $\bar{H} = 1$, ou seja, toda comunicação da rede é feita em um salto.

A carga da rede (L_c) é a variável que representa o quanto da capacidade da rede está sendo utilizada, podendo variar de “0 a 1” ou em porcentagem de “0% a 100%”. Portanto, a capacidade útil da rede (C_u), em um determinado momento é calculada pela equação:

$$C_u(L_c) = \frac{\sum_{k=2}^n k.N_k.S}{\bar{H}} .L_c \quad (4)$$

onde N_k é o número de nós com grau-k; S é a capacidade de cada enlace em Gbps, o n é o grau do nó (aqui $n=3$, mas pode ser até 6). O desempenho das redes não está ligado somente à disponibilidade de alta capacidade, mas também por outro parâmetro que é a vazão que está relacionada a capacidade e tempo de transmissão. Nota-se que quanto menor o \bar{H} , menor será o tempo que um pacote gastará para ser transmitido e isto acarretará maior vazão.

A vazão (T_p) (em inglês *throughput*) é um parâmetro que mede o fluxo efetivo de tráfego de pacotes que circulam na rede e baseia-se na capacidade útil da rede (C_u) (4), e pode ser calculada pela equação:

$$T_p = \frac{C_u(L_c)}{N} \quad (5)$$

Estudo detalhado da vazão verificar na referência [4.2].

O atraso médio dos pacotes (A_m) é a métrica de tempo médio de criação e trânsito dos pacotes desde o nó de origem até chegar ao seu destino final, considerando todos os tempos de propagação e roteamento, incluindo espera nos *e-buffers* de armazenamento (quando presentes).

$$A_m = \frac{p/r}{T_p} \quad (6)$$

A fração de perda de pacotes (PLF) mede a perda por descarte de pacotes durante o roteamento e é definida como a razão entre o número de pacotes ópticos que foram enviados e perdidos, dividindo pelo número total de pacotes gerados (pacotes enviados, recebidos e pacotes perdidos):

$$PLF = \frac{p-r}{p} \quad (7)$$

sendo p o número total de pacotes enviados e r o número total de pacotes recebidos.

Na próxima seção são apresentados as redes, os procedimentos e a metodologia de simulação.

4.2. Topologia Malha para redes OPS/OBS

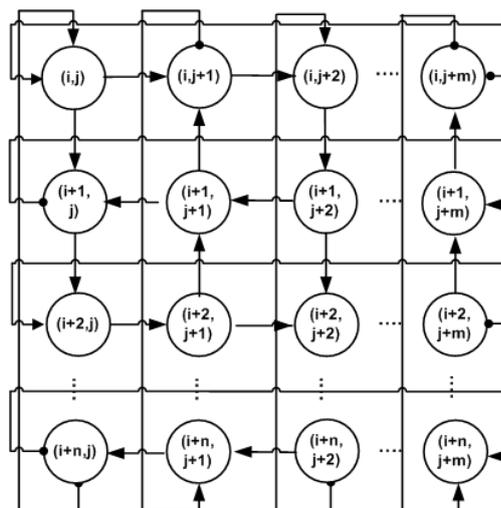
Nesta seção, é apresentada a topologia com base em conectividade de nós ópticos, ou seja, redes ópticas de topologia em malha da família *Manhattan Street – MS*, para investigar o tamanho ideal das redes metropolitanas, considerando as arquiteturas de comutação de redes OPS/OBS para distâncias moderadas e utilizando os roteamentos *DF – Deflection Routing* e *SF – Store and Forward*. A conectividade dos nós possibilita estabelecer uma comparação direta entre os parâmetros de desempenho, com as várias configurações de rede e graus de conectividade. Os resultados de simulação computacionais deste trabalho serão obtidos nestes modelos de redes.

A escolha por uma rede OPS/OBS está diretamente ligada ao tipo de aplicação que se pretende analisar. As redes OBS são mais atrativas para as aplicações em

tempo real como, por exemplo, vídeo conferência. As redes OPS são convenientes para conexões que não são sensíveis ao atraso, podendo os pacotes chegarem na ordem diferente da que foram enviados e, portanto serão reorganizados na chegada. Independentemente se for utilizado OPS ou OBS, o importante é que o número de saltos deve ser limitado e o atraso não deve ser percebido pelo usuário final.

A topologia MS foi escolhida devido a sua proximidade ao ambiente real, além de ser um modelo com alta capacidade de tráfego e robustez às falhas. A MS é uma topologia em malha (Figura 4.2) que pertence à família das chamadas redes multisaltos (*multihop networks*), nas quais há mais de uma rota entre quaisquer pares de nós, ou seja, o tráfego gerado em um determinado nó, pode passar por diversos nós intermediários antes de atingir o nó de destino. Este tipo de rede é constituído de uma malha regular bidimensional, sendo que cada nó tem dois enlaces (*links*) de entrada e dois enlaces de saída. Os braços paralelos e adjacentes, verticais e horizontais possuem sentidos alternados (daí a idéia de ruas e avenidas de *Manhattan*). Os nós extremos são sempre interligados aos nós (i, j) ligados aos nós $(i, j+m)$ e nós $(i+n, j)$ ligados aos nós $(i+n, j+m)$, onde i é a variação do número de linhas, $i = 1, \dots, n$ e j é a variação do número de colunas, $j = 1, \dots, m$ (Figura 11).

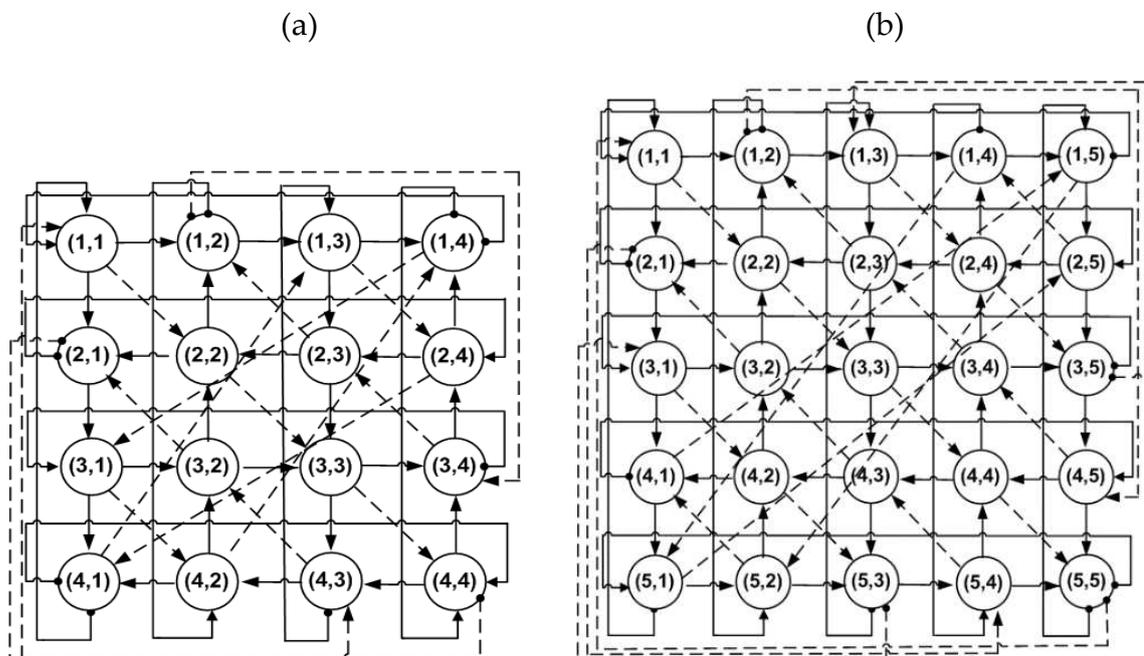
Figura 4.2: Rede com topologia MS genérica.



O modelo MS pode ser do tipo regular quando o número de nós da rede for par e, quase regular, quando for ímpar. Ou seja, é uma rede altamente conectada, com fechamento toroidal, e sua principal característica são as opções de caminhos que os pacotes podem utilizar para chegarem aos seus endereços de destino. Característica esta que é particularmente relevante nos projetos de redes em caso de ocorrência de falhas, ou congestionamento de tráfego de enlaces em um dado caminho, pois os pacotes são facilmente direcionados a seu destino por outro caminho como nas redes IPs [4.5].

O modelo topológico é ilustrado na Figura 4.3, e configurado com nós de 3 entradas e 3 saídas (grau 3), mais as funcionalidades *add/drop* da topologia original. Neste modelo, além das conexões tradicionais do modelo MS, os nós também são conectados na diagonal, utilizando uma conectividade lógica semelhante à rede MS, formando assim uma topologia toroidal 3D.

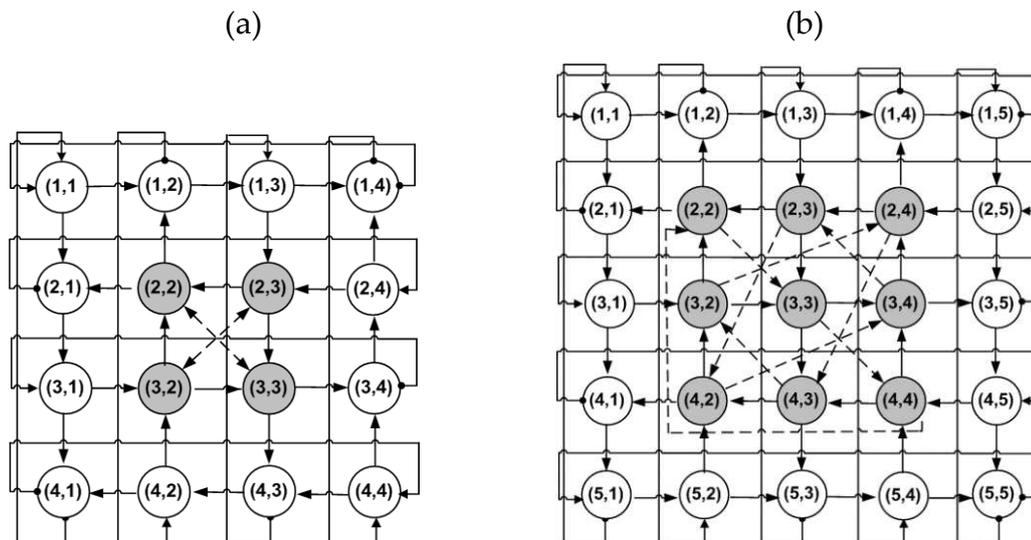
Figura 4.3: Redes grau 3: (a) MS-16, (b) MS-25, enlaces unidirecionais.



A topologia para redes metropolitana OPS/OBS também utilizada nas simulações, é a Manhattan St híbrida com os nós centrais de grau-3 (interconexões 3x3) e as bordas com grau-2. Este tipo de configuração balanceia a capacidade e

conectividade, ou seja, o custo e o desempenho. Os enlaces entre os nós tem comprimento de 10-20 km e taxas de *bits* de 2,5 – 5 Gbps. O diagrama de rede com conexões grau-2 e grau-3, são ilustradas nas Figura 4.4 (a) e (b).

Figura 4.4: Rede MS-híbrida – OPS/OBS: (a) MS-16 e (b) MS-25 . Enlaces unidirecionais.

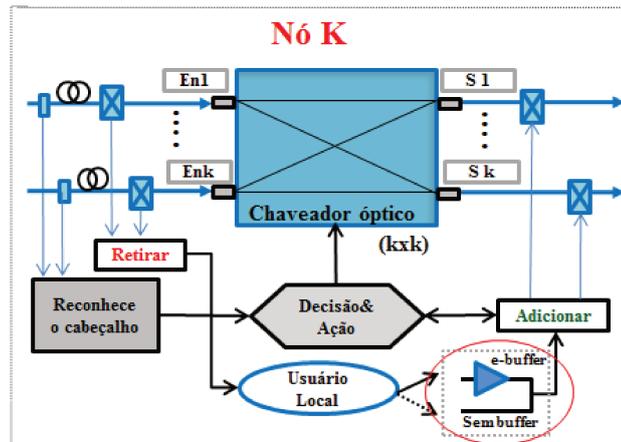


4.3. Configuração do Simulador e Metodologia

Esta seção descreve os métodos, condições e procedimentos utilizados na obtenção dos resultados que serão apresentados e discutidos no Capítulo 5.

Primeiramente é realizada uma descrição referente ao nó óptico e seus elementos. O nó óptico é um elemento passivo, tendo como funcionalidade o chaveamento dos pacotes para seus destinos. Resumidamente, um nó óptico é constituído por elementos tais como, portas de entrada, saídas, portas para adicionar e remover pacotes na rede, linha de retardo, um processador eletrônico e *e-buffer*, como são mostrados na Figura 4.5.

Figura 4.5: Nó óptico



As funcionalidades dos elementos que constituem o nó são:

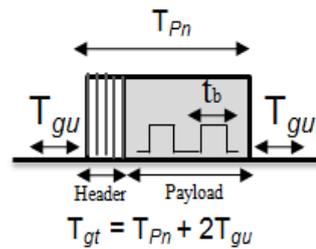
- Portas de entrada (En_1, \dots, En_k) e saída (S_1, \dots, S_k): por onde os pacotes acessam e deixam os nós;
- Portas adicionar/remover por onde os pacotes são adicionados ao nó de origem e retirados do nó de destino;
- Linha de retardo: fica no processador de cabeçalho e é responsável por atrasar a carga útil do pacote para processamento do cabeçalho;
- Controle eletrônico: processa e reconhece o cabeçalho;

A dinâmica da comutação fotônica tem o seguinte procedimento: um pacote/rajada óptico (pacote 1) de duração T_{P1} chega ao conjunto de nó óptico e bloqueia o interruptor óptico que é a sua rota preferida. Um outro pacote (pacote 2) de duração T_{P2} chega no mesmo período de bloqueio (também chamado de *gate time*) T_{gt} garante que o pacote óptico não colida com o outro pacote, devido a inclusão do tempo de guarda T_{gu} em ambas as extremidades. O tempo de chaveamento óptico equivalente é:

$$T_{gt} = T_{pn} + 2.T_{gu} \quad (8)$$

sendo T_{pn} referente a qualquer pacote óptico n .

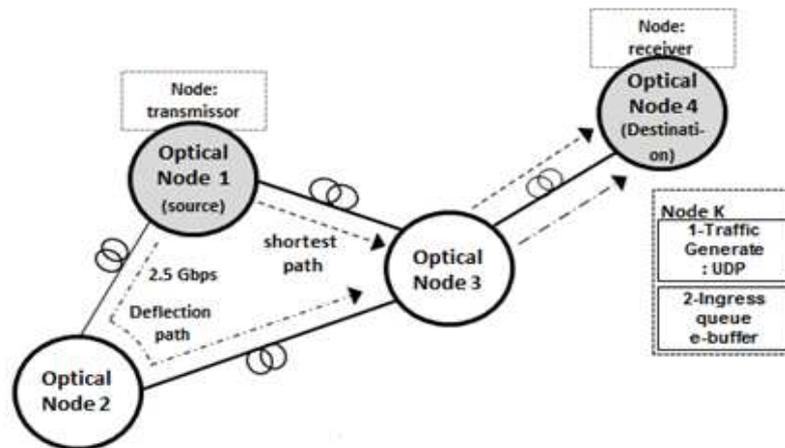
Figura 4.6: Pacote óptico para comutação fotônica.



O pacote óptico possui o tamanho fixo de 500 *bytes* ou maior para chaveamento por rajada. A taxa de transmissão é fixada em 2,5 Gbps, pois é adequada para o ambiente de metro acesso, extensível para 10 Gbps. O número total de pacotes gerados nos ciclos de simulação é 200.000 (2×10^5), tendo um intervalo de 20 ms entre os ciclos. A taxa de erro de *bit* (BER) é assumida menor do que 10^{-9} e o comprimento de cada enlace é de 10 km. Note-se que na Figura 4.5 a implementação do *e-buffer* aparece tanto para o DR, quanto para o SF. Entretanto o SF sempre usa *buffering* ilimitado, tal como discutido anteriormente no Capítulo 4, o que impacta ainda mais o atraso do tráfego dos pacotes na rede.

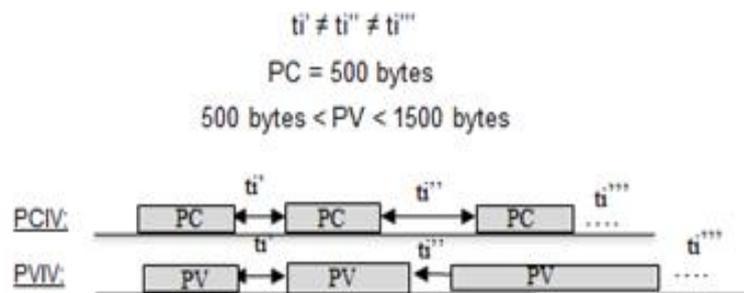
Os modelos de rede usam enlaces unidirecionais (Figura 4.7), com a distribuição de tráfego uniforme (cada nó gera a mesma quantidade de tráfego para todos os outros nós) e intervalos de 20 ms entre os ciclos de simulação. Cada conexão é configurada utilizando protocolos UDP, pois os enlaces são unidirecionais e não há possibilidade de *acknowledge*. Nesse caso, os pacotes perdidos não são retransmitidos, e a estimativa do PLF é feita a partir dos pacotes ópticos efetivamente recebidos no destino.

Figura 4.7: Esquemático da Simulação



Os resultados são obtidos através de simulações de tráfego dos pacotes ópticos, baseados no modelo dinâmico de tráfego utilizado pelos protocolos SF (caminho mínimo) e DR (tempo mínimo), conforme ilustrado na Figura 4.8.

Figura 4.8: Geração de tráfego



Utilizou-se nas simulações de rede o *Network Simulator (NS-2)*, que é uma plataforma aberta, cujas funcionalidades foram criadas e adaptadas no laboratório LTF/FEEC/UNICAMP. Para estudos analíticos, processamento dos dados e plotagem dos gráficos utilizou-se o *Matlab®* acadêmico.

Nas tabelas seguintes temos os parâmetros utilizados para configurar o simulador. Para facilitar a compreensão, dividimos os parâmetros em dois grupos. Os parâmetros pré-fixados, tais como o protocolo da camada de transporte, taxa de transmissão dos enlaces, comprimento do enlace, taxa de transmissão de bits e carga do enlace são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Parâmetros fixos utilizados na simulação

Protocolo camada transporte	UDP
Taxa de transmissão dos enlaces	2,5 Gbps
Comprimento do enlace	10 km
Taxa de transmissão de bits	<i>Constant Bit Rate</i> – CBR
Carga de enlace	1 a 100% da Capacidade do <i>enlace</i>

Os parâmetros classificados como variáveis são aqueles ajustados a cada simulação tais como tipo de tráfego, grau de conectividade e roteamento são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Parâmetros variáveis ajustados a cada simulação

	Tipo de Tráfego	Grau de conectividade	Roteamento	
bufferless	PCIV <i>(pacotes com tamanho de 500 bytes)</i>	MS Grau 2	DR	SF
		MS Grau 3	DR	SF
		Hibrida	DR	SF
	PVIV <i>(pacotes variáveis de $500 < PV < 1500$)</i>	MS Grau 2	DR	SF
		MS Grau 3	DR	SF
		MS Hibrida	DR	SF
Com buffer	PCIV <i>(pacotes com tamanho de 500 bytes)</i>	MS Grau 2	DR	SF
		MS Grau 3	DR	SF
		Hibrida	DR	SF
	PVIV <i>(pacotes variáveis de $500 < PV < 1500$)</i>	MS Grau 2	DR	SF
		MS Grau 3	DR	SF
		MS Hibrida	DR	SF

Os resultados dos cálculos analíticos e das simulações realizadas, bem como as respectivas análises e discussões serão apresentados no Capítulo 5.

Referências

- [4.1] F. R. Barbosa, “Redes Óticas” – curso de pós-graduação, FEEC – Unicamp – SP, Disponível em: <http://www.dsif.fee.unicamp.br/~rudge/>
- [4.2] I. B. Martins, “Análise de Desempenho e Proteção em Redes Óticas Convergentes com Chaveamento Fotônico”, Dissertação de Doutorado, FEEC/Unicamp, 2011
- [4.3] F. R. Barbosa, I. B. Martins, Y. Martins e E. Moschim, “Comparative Study of Latency and Throughput in OPS/OBS Metro Access Network”, *Networks’ 2014 – Madeira PT, Sept 2014*.
- [4.4] Y. Martins, F. R. Barbosa, I. B. Martins e E. Moschim, “Influence of Topology Connectivity for Transport in Optical Networks with Amplified Photonic Switches”, *Icton Graz 2014 –Austria PT, July 2014*.
- [4.5] Achille Pattavina, “Performance of deflection routing algorithms in IP optical transport networks” *J. Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking - Optical networks*, Vol. 50 Issue 2, February 2006.
- [4.6] Martins, I.B.; Perez-Sanchez, G.; Gallion, P.; Rudge, F.; Moschim, E., “Performance of WDM networks with photonic switching and resource distribution planning,” *Network and Optical Communications (NOC), 2013 18th European Conference on and Optical Cabling and Infrastructure (OC&i), 2013 8th Conference on* , pp. 241-248, 10-12 July 2013
- [4.7] A. S. Acampora and S. I. A. Shah, "Multihop lightwave network: a comparison of store-and-forward and hot potato routing", *IEEE Trans. Communications*, vol.40, no.6, pp. 1082-1090(1992).
- [4.8] Martins, I.B.; Rudge, F.; L.H.Bonani, e Moschim, E., “Contribution to future metropolitan access network planning considering link failures in photonic switched networks”, *PNET - Photonic Network Communications*, vol. 24, issue 3, pg.187-197, Dezembro 2012..

5. Resultados Analíticos e Simulações Computacionais

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados analíticos e de simulações. Nas simulações foi utilizado o simulador *Network Simulator 2*, que é um *software* com código aberto, bastante empregado em estudos de redes ópticas, abrangendo a camada de transporte. Para se obter a capacidade útil da rede, foram analisados os resultados referentes aos parâmetros fração de pacotes perdidos (PLF), número médio de saltos (ANH) e o atraso médio (Am). Estes parâmetros foram definidos matematicamente na Seção 4.1 do Capítulo 4.

5.1. Resultados analíticos

Nesta seção, resumem-se na Tabela 5.1 os resultados matemáticos analíticos da capacidade total e da capacidade útil da rede em função do parâmetro ANH. Os resultados foram obtidos usando o protocolo SF e ANH =1, pois são considerados como o melhor cenário da rede. Verifica-se que a rede com conectividade híbrida tem um desempenho melhor do que a rede de grau-2, mas continua abaixo das redes com conectividade de grau-3.

Tabela 5.1: Cálculo das capacidades - Total C_t e Útil C_u da rede, topologia MS e para o protocolo SF.

Topologia		Capac. total - C_t (Gbps)	ANH	Capac. útil - C_u (Gbps)
Grau 2	MS-16	80	2.9	27,5
	MS-25	62.5	3.3	15,15
Grau 3	MS-16	120	1.6	75
	MS-25	187.5	2.0	93,7
Híbrida	MS-16	95	2.5	38
	MS-25	147.5	2.9	50,8

Não foram feitos os cálculos analíticos do C_u e C_t em função do atraso médio para os roteamentos DR e SF e nem a utilização do roteamento DR para o ANH, pois estes requerem premissas estocásticas de tráfego (estatística de pacotes e roteamento, bem como carga variável de enlace) [5.6]. Sendo assim, estes resultados foram obtidos via simulação.

5.2. Resultados de Simulações

Os resultados obtidos por meio de simulações e discutidos nesta seção são referentes aos parâmetros ANH, PLF e A_m . As topologias de rede utilizadas são a MS regulares e irregulares (para 16 e 25 nós) sendo constituídas por nós ópticos com grau de conectividade 2, 3 e híbrida, podendo estes terem ou não *e-buffer* na porta de entrada para os pacotes que são gerados na rede. O tráfego gerado nas simulações são do tipo PCIV e PVIV, conforme é ilustrado na Figura 4.7 no Capítulo 4.

Para estimar o desempenho oferecido por uma rede, é necessário considerar e analisar parâmetros como ANH, A_m e o PLF. Estes parâmetros medem o número médio de saltos, o atraso médio para que um pacote chegue ao seu destino final e as perdas de informação, auxiliando uma análise referente à capacidade e à confiabilidade da rede analisada.

A análise do ANH e do atraso médio (A_m) são complementares. O ANH considera a quantidade de saltos que o pacote efetua para chegar ao seu destino, sem considerar os tempos gastos, como por exemplo, o de processamento do cabeçalho do pacote e o de *e-buffer*. O atraso médio (A_m) é mais abrangente, pois inclui todos os tempos gastos, inclusive o de processamento e o de *e-buffer*. Para a redução da perda de pacotes (PLF) devido a falta de sincronismo quando os pacotes gerados no nó óptico são inseridos na rede, utiliza-se a aplicação de *buffer* eletrônico na interface do nó de entrada dos pacotes do cliente, antes da porta Adicionar ilustrada na Figura 4.5 do Cap.4, no nó de acesso. O tamanho do *e-buffer* é limitado em 10 pacotes

armazenados, em contraste com outras abordagens em que o atraso pode crescer excessivamente [5.6].

Nas seções seguintes são descritos os resultados obtidos na simulação. Portanto, para uma melhor organização dos resultados, estes foram analisados considerando a seguinte estrutura: Seção 5.2.1 tráfego PCIV e Seção 5.2.2 tráfego PVIV.

5.2.1. Tráfego PCIV

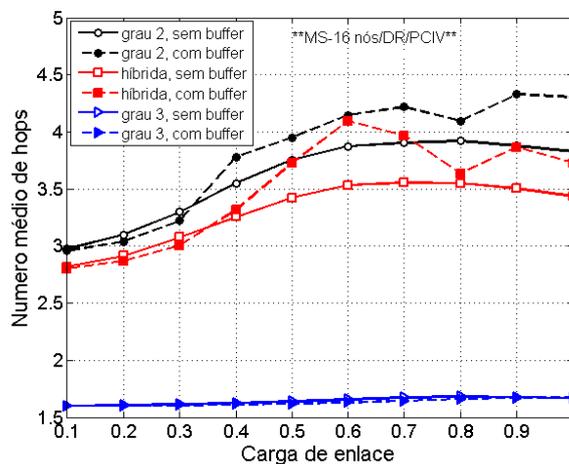
Nesta seção é realizada a análise do ANH, Am e PLF utilizando a geração de pacotes de tamanho constante de 500 *bytes* e intervalos variáveis (PCIV), em redes MS de 16 e 25 nós e com roteamento DR e SF.

Inicialmente foram analisados os resultados obtidos do ANH, Am e PLF considerando roteamento DR em redes MS 16.

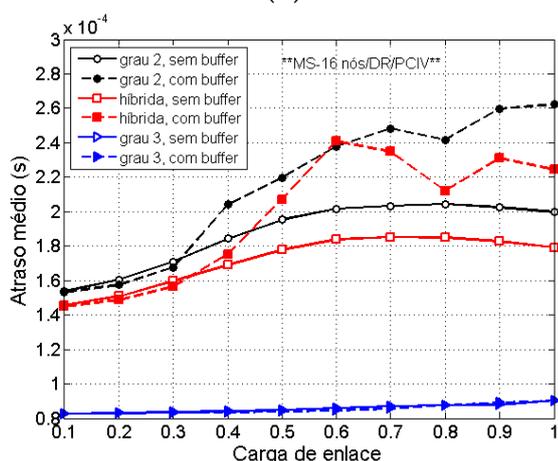
Na Figura 5.1(a) observa-se que o ANH aumenta de acordo com a carga de enlace para as redes com conectividade de grau 2, híbrida, com e sem *e-buffer*. Observa-se que tanto a rede com conectividade de grau 2, quanto a híbrida o número médio de saltos varia de aproximadamente três até quatro, ou seja, teve um aumento de um salto. A rede de grau 3 que possui maior conectividade, o ANH permanece praticamente constante com valores inferiores a dois, com ou sem o *e-buffer* e para as diferentes cargas.

O Atraso médio (Am) ilustrado na Figura 5.1 (b), tem um aumento significativo em torno de duas vezes para as redes de conectividade grau 2 com o *e-buffer*, variando inicialmente de aproximadamente 140 μs até 260 μs quando chega a capacidade máxima utilizada da rede. Para a rede híbrida observa-se que o atraso permanece menor em 40 μs comparado com a de grau 2, considerando o valor de carga máxima do enlace. A rede de grau 3, o Am é praticamente constante igual a 80 μs .

Figura 5.1: Rede MS-16 e roteamento DR: (a) ANH, (b) Atraso médio (Am)



(b)

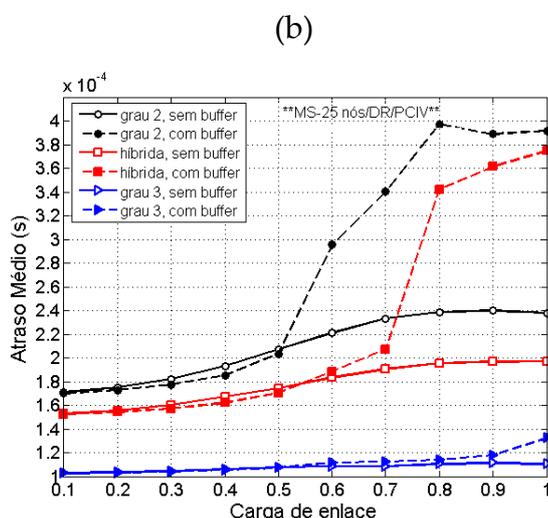
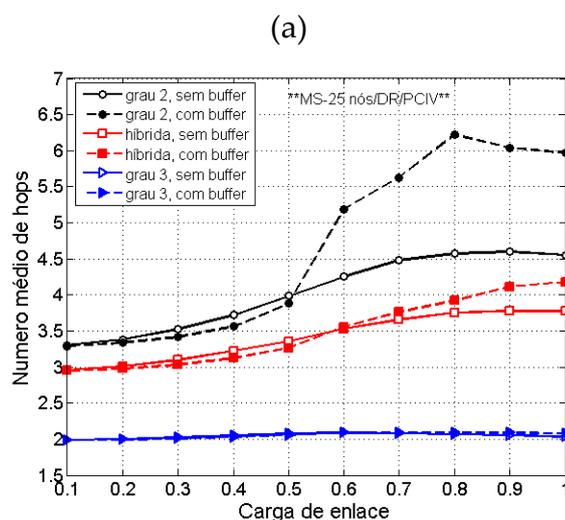


A mesma simulação foi feita para as redes MS-25 nós utilizando o roteamento DR.

A Figura 5.2 (a) ilustra que o ANH para as redes de grau 2, varia de três até seis saltos e para as redes híbridas de três até quatro saltos para que o pacote chegue em seu destino final. Nota-se que quando a carga da rede é maior que 50%, existe um aumento de saltos para todas as topologias, porém o impacto é de maior relevância para a de grau 2, devido a menor conectividade oferecida. Para a topologia com nós de grau 3, as que possuem maior conectividade, o ANH permanece constante, aproximadamente igual a dois, com ou sem o *e-buffer*, para as diferentes cargas.

O resultado do Atraso médio (A_m) para a rede MS-25 nós ilustrado na Figura 5.2 (b) é semelhante ao encontrado para a de MS-16 nós ilustrado na Figura 5.1 (b). O Atraso médio (A_m) possui valores menores que $200 \mu s$ para as redes de conectividade de grau 2 e híbrida para as cargas inferiores a 50%. Nota-se que para as redes de grau 2 e híbrida com *e-buffer* quando atingem cargas acima de 50%, possuem picos de $400 \mu s$ e $380 \mu s$, respectivamente. Estes picos são justificados com a adição do *e-buffer* para reduzir o PLF, portanto tem como consequência um aumento de pacotes ópticos circulando na rede. O A_m para a rede com conectividade de grau 3 permanece abaixo de $120 \mu s$, tendo apenas um aumento de $20 \mu s$, quando a carga do enlace chega a 100%.

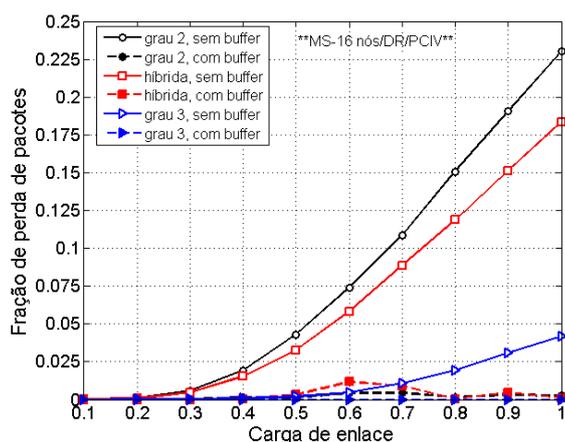
Figura 5.2: Rede MS-25 e roteamento DR: (a) ANH, (b) Atraso médio (A_m)



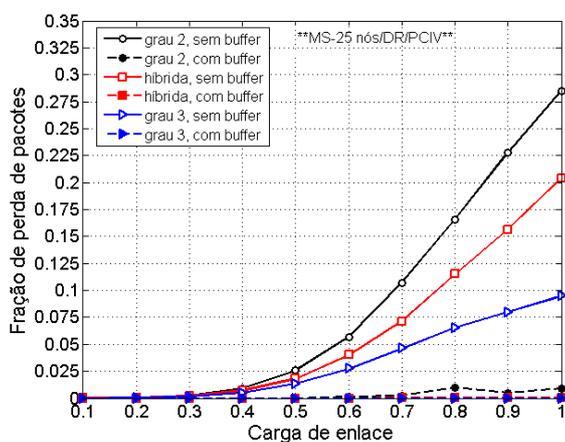
O PLF obtido para a rede MS-16 nós, ilustrada na Figura 5.3 (a) e para a de MS-25 nós, ilustrada na Figura 5.3 (b), quando implementadas com o *e-buffer* nos nós de entrada, as perdas de pacotes tendem a zero. O resultado do PLF sem a implementação do *e-buffer* varia de acordo com a conectividade. Para as redes com conectividade maiores, por exemplo, a de grau 3 as perdas para MS-16 e MS-25 chegam a 5% e 10% respectivamente. Para o modelo híbrido, as perdas de pacotes para a MS-16, quanto para a MS-25 nós, aproximam-se de 20% . Para as redes de grau 2, as perdas foram de 23% para a MS-16 nós e 30% para a MS-25 nós. Estas análises foram feitas considerando o ponto em que a carga de utilização do enlace é máxima.

Figura 5.3: (a) PLF - MS-16, (b) PLF - MS-25 roteamento DR

(a)



(b)

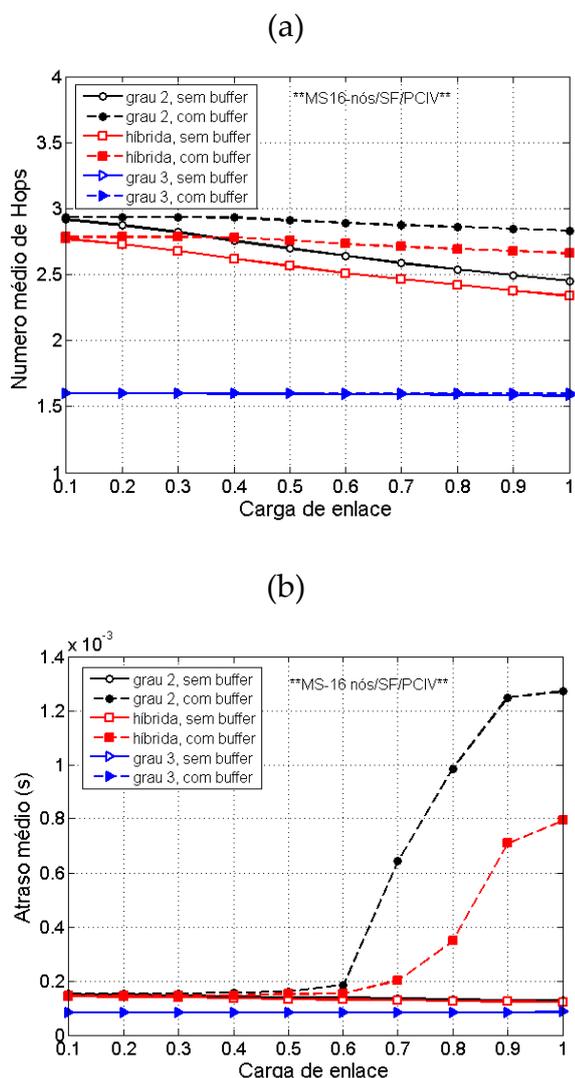


Para complementar a análise do tráfego PCIV foram feitas as mesmas simulações, considerando o roteamento SF. O roteamento SF, conforme definido anteriormente, Cap. 3, armazena o pacote para depois encaminhá-lo, sendo necessário um *buffer* para garantir que o pacote seja transportado para seu endereço de destino final, sempre utilizando a rota de menor caminho. Este *buffer* só é utilizado quando a rota preferencial de um determinado pacote esteja ocupada por outro pacote.

Na Figura 5.4 (a) o ANH apresenta uma pequena variação, pois como foi utilizado um *e-buffer* de tamanho 10, alguns pacotes são descartados, conforme há um aumento da carga. Portanto, a quantidade de pacotes circulando na rede tende a diminuir de acordo com o aumento da carga. Na rede com nós de grau 2 e híbrida, com e sem *e-buffer*, a distância que o pacote irá percorrer para chegar ao destino final é de aproximadamente três saltos. Para a rede com nós de grau 3, o ANH permanece constante igual a dois, com ou sem o *e-buffer*.

Na Figura 5.4 (b) o Atraso médio (A_m) para a rede de grau 2 e a híbrida, tem um aumento significativo quando o *e-buffer* é adicionado na porta Adicionar, ilustrada na Figura 4.5 do Cap.4. Para as redes de grau 2 e híbrida, com cargas de enlace até 50% o A_m é de 200 μs , mas quando a carga da rede está acima de 60% o atraso tende a crescer linearmente, chegando a 1200 μs e 800 μs respectivamente para a carga máxima de enlace. Para as redes grau 2 e híbrida sem o *e-buffer* e a de grau 3 com ou sem o *e-buffer*, o A_m é menor que 200 μs .

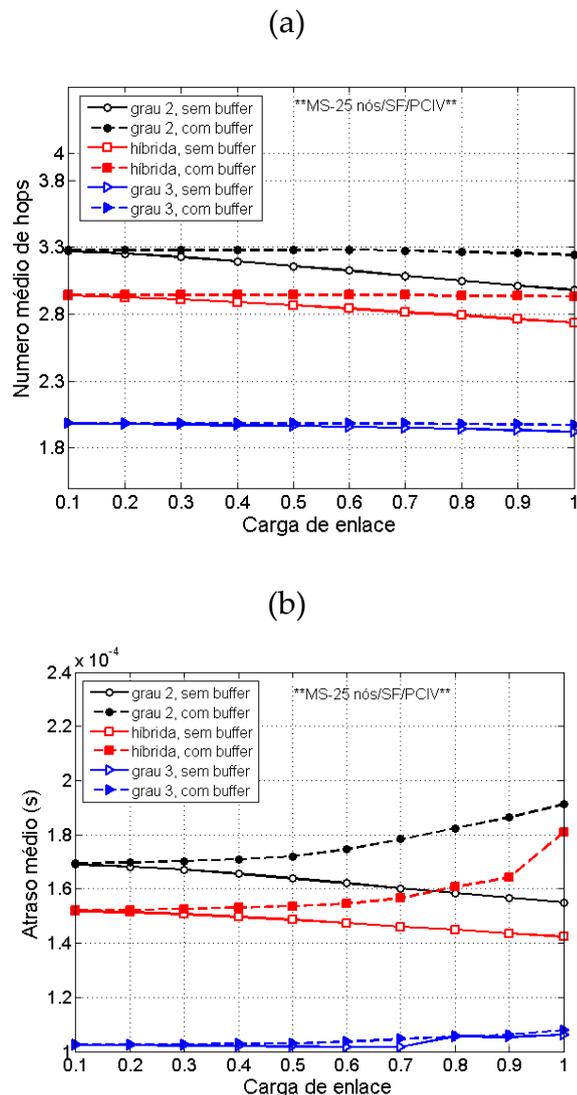
Figura 5.4: Rede MS-16 e roteamento SF: (a) ANH, (b) Atraso médio (A_m)



A mesma simulação foi feita para a rede MS de 25 nós.

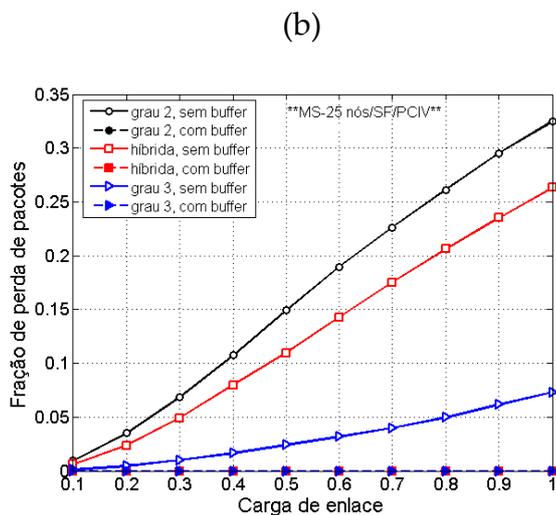
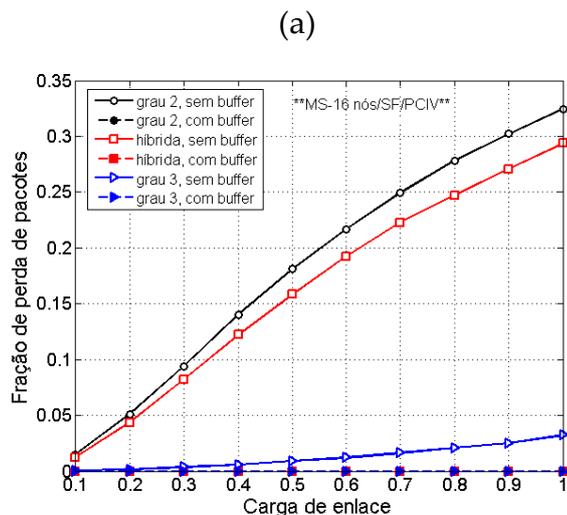
O ANH representado na Figura 5.5 (a) é constante sendo de aproximadamente três para a rede que utiliza nós de grau 2 e híbrida com ou sem *e-buffer*. Para a de grau 3, é constante e igual a dois.

Na Figura 5.5 (b) ilustra-se o Atraso médio (A_m) para uma rede com 25 nós. O valores de atraso para as redes de grau 2, híbrida e grau 3 com e sem *e-buffer* são de aproximadamente 100 μ s, 150 μ s e 170 μ s respectivamente. Nota-se que quando o *e-buffer* é considerado, o atraso aumenta em função da carga e sem o *e-buffer*, o atraso diminui, justificado pela perda de pacotes que é analisada na Figura 5.6.

Figura 5.5: Rede MS-25 e roteamento SF: (a) ANH, (b) Atraso médio (A_m)

Para o PLF, como esperado para a rede MS-16 nós, ilustrado na Figura 5.6 (a) e para a de MS-25 nós ilustrado na Figura 5.6 (b), quando implementadas com o *e-buffer* nos nós de entrada, as perdas de pacotes tendem a zero. O resultado do PLF sem a implementação do *e-buffer* varia de acordo com a conectividade. Para as redes com conectividade maiores, como, por exemplo, a de grau 3, as perdas para MS-16 e MS-25 chegam em 3% e 8% respectivamente. Para o modelo híbrido, as perdas de pacotes para a MS-16 e para a de MS-25 nós, foram de 29% e 26% respectivamente. Para as redes MS-16 e MS-25 com conectividade de grau 2, as perdas foram de 33%. Estas análises foram feitas considerando o ponto em que a carga de utilização do enlace é máxima.

Figura 5.6: (a) PLF - MS-16, (b) PLF - MS-25 roteamento SF



Nesta seção foram feitas simulações para analisar o tráfego de pacotes gerados com tamanhos constantes nas redes MS-16 e MS-25, com diferentes graus de conectividade e roteamentos.

Na Seção 5.2 são analisados o ANH, Atraso médio (A_m) e o PLF para as redes MS-16 e MS-25, com grau de conectividade 2, 3 e híbrida, e tráfego de pacotes com tamanho variável. O objetivo de simular o tráfego com pacotes de tamanho variável e em intervalos variáveis é obter valores mais próximos de um ambiente real.

5.2.2. Tráfego PVIV

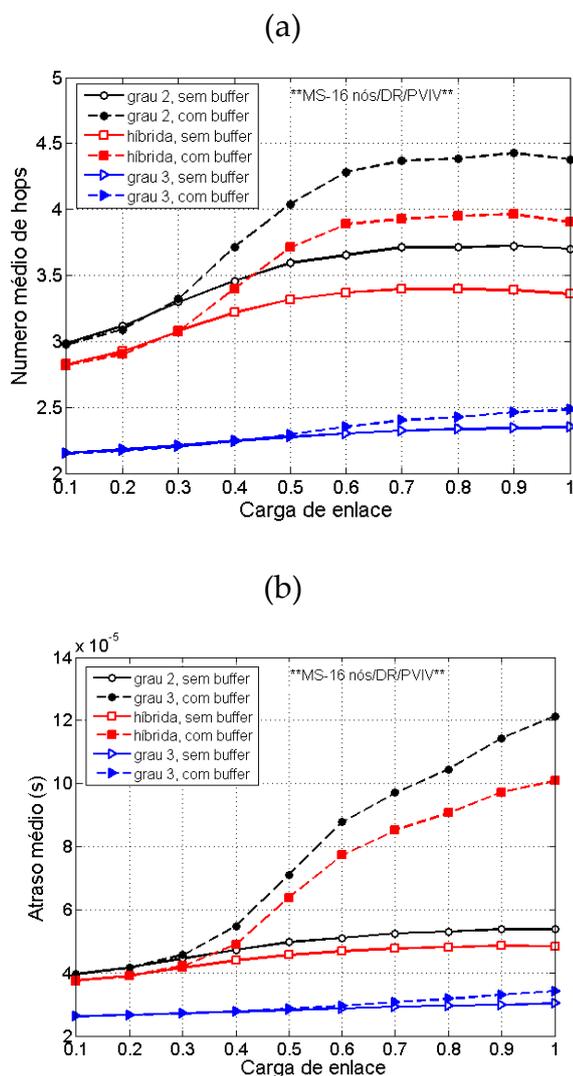
Nesta seção é feita a análise do ANH, Atraso médio (A_m) e PLF, utilizando a geração de pacotes de tamanho variáveis (PVIV) de 500 bytes até 1500 bytes em redes MS de 16 e 25 nós, com diferentes graus de conectividade, com e sem a implementação do *e-buffer* no nó óptico e, utilizando o roteamento DR e SF.

Inicialmente são analisados os resultados obtidos do ANH, Atraso médio (A_m) e PLF, considerando o roteamento DR em redes MS 16 nós.

Na Figura 5.7(a) observa-se que o ANH aumenta de acordo com a carga de enlace para as redes com conectividade de grau 2, híbrida, com e sem *e-buffer*. Para a rede de conectividade de grau 2 e híbrida com o *e-buffer*, o número médio de saltos varia de três até cinco e de três até quatro respectivamente. Para estas mesmas redes sem o *e-buffer*, o número médio de saltos varia de três até quatro, ou seja, têm aumento de um salto. A rede de grau 3 que possui maior conectividade, o ANH permanece praticamente constante igual a 2, com ou sem o *e-buffer* e para as diferentes cargas.

O Atraso médio (A_m) ilustrado na Figura 5.7(b), tem um aumento significativo, em torno de três vezes para as redes de conectividade grau 2 com o *e-buffer*, variando inicialmente 40 μs até 120 μs , quando atinge a capacidade máxima utilizada da rede. Na rede híbrida, observa-se que o atraso permanece menor em 20 μs em relação a de grau 2, para o valor de carga máxima do enlace. Na rede de grau 3 o A_m é praticamente constante igual a 25 μs e tem um pequeno aumento, quando se aproxima da carga máxima do enlace.

Figura 5.7: Rede MS-16 e roteamento DR: (a) ANH, (b) Atraso médio (Am)

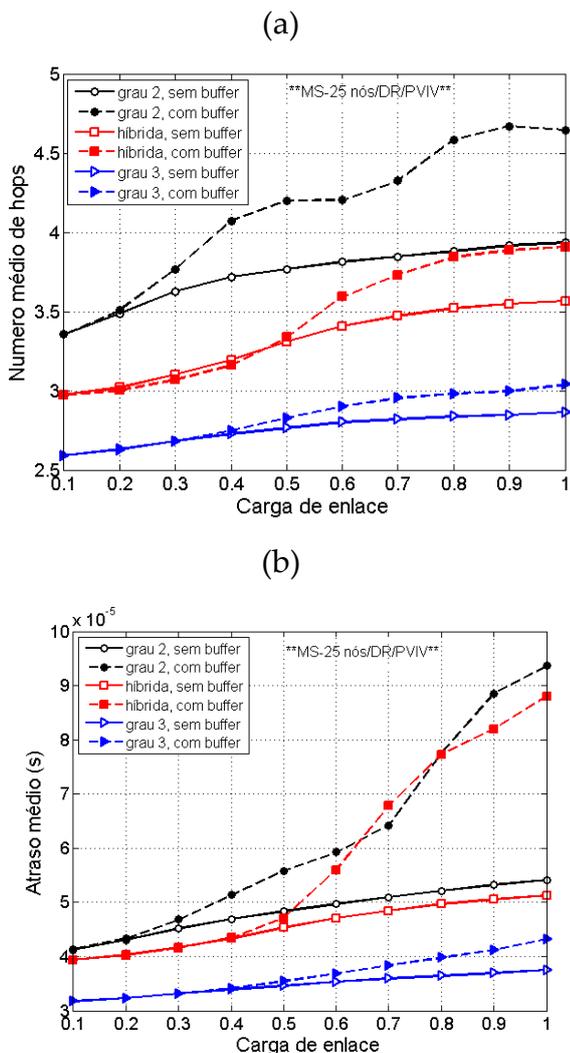


Na Figura 5.8 (a) ilustra-se que o ANH para as redes de grau 2 varia de três até aproximadamente a cinco e para as redes híbridas de três até quatro saltos, para que o pacote chegue em seu destino final. Nota-se que quando a carga da rede é maior que 30% existe um aumento de saltos para todas as redes, porém o impacto é de maior relevância na de grau 2, devido a menor conectividade oferecida como analisado anteriormente no tráfego PCIV. Na rede com nós de grau 3, com ou sem o *e-buffer*, o ANH aumenta para as cargas acima de 40%, chegando a três saltos quando a carga de enlace é máxima.

O resultado do Atraso médio (Am) na rede MS-25 nós ilustrado na Figura 5.8 (b) é semelhante ao encontrado na de MS-16 nós ilustrado na Figura 5.7 (b). O Atraso

médio (A_m) possui valores menores que $100 \mu s$ para as redes de grau 2, $90 \mu s$ para a híbrida e menores de $50 \mu s$ para a de grau 3. Nota-se que nas redes de grau 2, híbrida e grau 3, o aumento inicial do atraso destaca nas cargas de enlace que são em 20%, 30% e 40%, respectivamente.

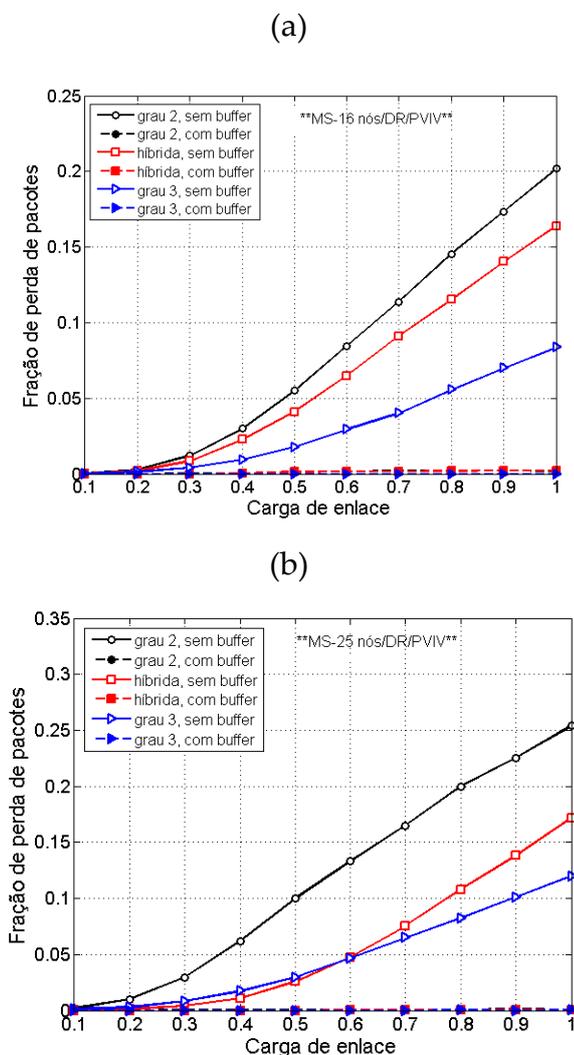
Figura 5.8: Rede MS-25 e roteamento DR: (a) ANH, (b) Atraso médio (A_m)



O PLF, tanto para a rede MS-16 nós (Figura 5.9 (a)), quanto para a de MS-25 nós (Figura 5.9 (b)), quando implementadas com o *e-buffer* nos nós de entrada, as perdas de pacotes se reduzem a zero. Nas redes com conectividade maiores, como, por exemplo, a de grau 3, as perdas para a MS-16 e a MS-25 chegam a 8% e 12% respectivamente. No modelo híbrido, essas perdas de pacotes nas redes MS-16 e MS-25 nós, aproximam-se a 17%. Nas redes MS-16 e MS-25 de grau 2, as perdas foram de

20% e de 25% respectivamente. Estas análises foram feitas considerando o ponto em que a carga de utilização do enlace é máxima.

Figura 5.9: (a) PLF - MS-16, (b) PLF - MS-25 roteamento DR

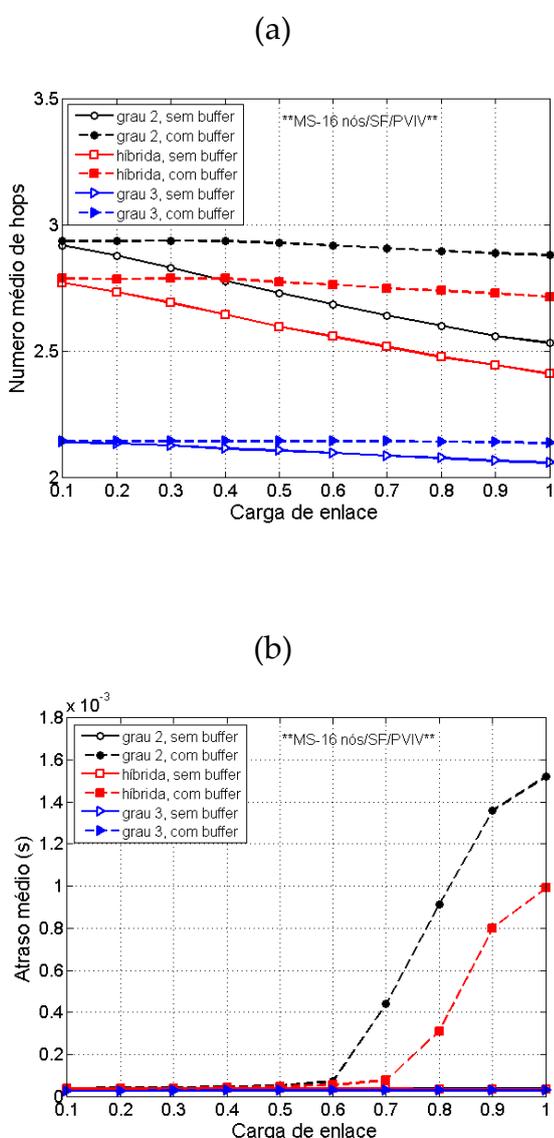


Para finalizar a análise do tráfego PVIV é realizada a mesma simulação para o roteamento SF. Como foi falado na Seção 5.2.1, o roteamento SF armazena e em seguida encaminha o pacote.

Na Figura 5.10 (a) o ANH apresenta o mesmo comportamento analisado para PCIV Figura 4 (a) em que a quantidade de pacotes circulando na rede tende a diminuir de acordo com o aumento da carga. Na rede com nós de grau 2, híbrida e grau-3, com e sem *e-buffer*, a distância que o pacote irá percorrer para chegar no destino final é de aproximadamente dois e três saltos..

Na Figura 5.10 (b), o Atraso médio (A_m) na rede de grau 2 e híbrida, tem um aumento significativo, quando o *e-buffer* é adicionado na porta ilustrada na Figura 4.5 do Cap.4. Nas redes de grau 2 e híbrida, com carga de enlace até 60% não há atraso na entrega dos pacotes, mas quando a carga da rede está acima de 60 % o atraso tende a crescer linearmente, chegando a 1500 μ s e 1000 μ s respectivamente para a carga máxima de enlace. Nas redes grau 2 e híbrida, sem o *e-buffer*, e a de grau 3 com ou sem o *e-buffer* não há atraso na entrega dos pacotes.

Figura 5.10: Rede MS-16 e roteamento SF: (a) ANH, (b) Atraso médio (A_m)

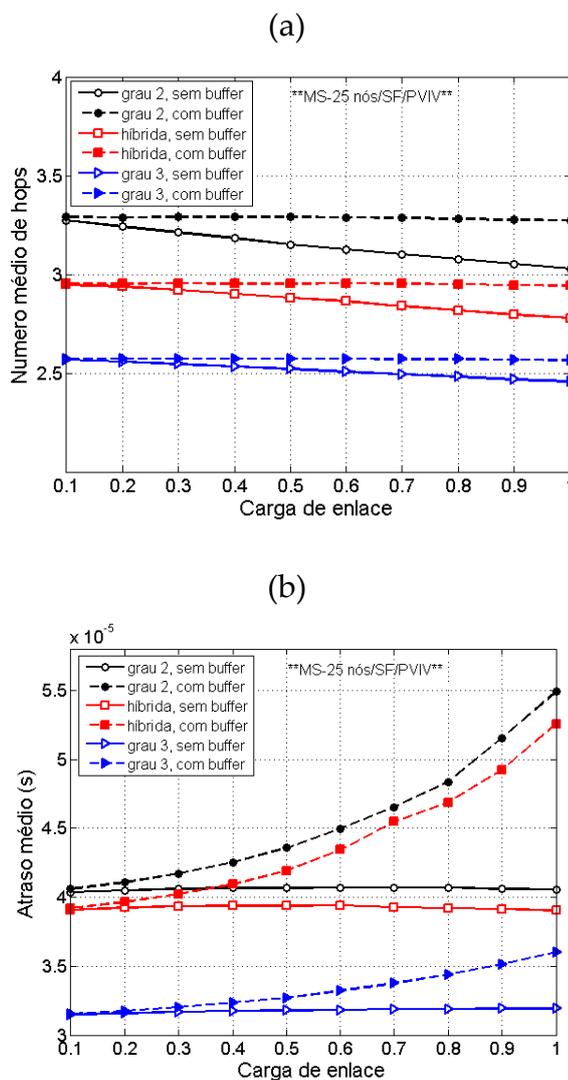


A mesma simulação foi feita na rede MS de 25 nós.

O ANH representado na Figura 5.11 (a) é constante, sendo de aproximadamente três para a rede que utiliza nós de grau 2 e híbrida, com ou sem *buffer*. Na de grau 3, é constante e igual a dois.

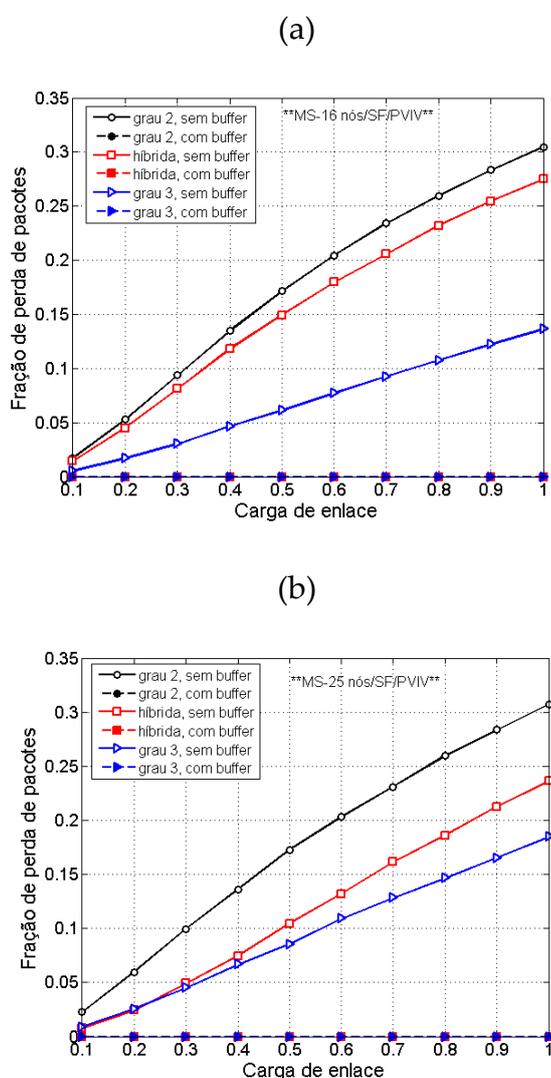
Na Figura 5.11 (b) ilustra-se o Atraso médio (A_m) numa rede com 25 nós. O valores de atraso nas redes de grau 2, híbrida e grau 3 com e sem e-buffer são de aproximadamente 55 μ s, 53 μ s e 36 μ s respectivamente com carga máxima de enlace. Nota-se que quando o *e-buffer* é considerado, o atraso aumenta em função da carga e sem o *e-buffer*, o atraso diminui justificado pela perda de pacotes que é analisada na Figura 5.12.

Figura 5.11: Rede MS-25 e roteamento DR: (a) ANH, (b) Atraso médio (A_m)



Para o PLF, como esperado, tanto para a rede MS-16 nós (Figura 5.12 (a)), quanto para a de MS-25 nós (Figura 5.12 (b)), quando implementadas com o *e-buffer* nos nós de entrada, as perdas de pacotes tendem a zero. Nas redes com conectividade maiores, por exemplo, a de grau 3, as perdas para MS-16 e MS-25 chegam a 20%. Para o modelo híbrido, as perdas de pacotes para a MS-16 e MS-25 nós, foram de 28% e 24% respectivamente. Na de grau 2, as perdas foram de 30%, tanto para a MS-16 nós, quanto para a de MS-25 nós. Estas análises consideram carga máxima de utilização do enlace (100%).

Figura 5.12: (a) PLF - MS-16, (b) PLF - MS-25 roteamento SF



Nesta seção foram feitas simulações para analisar o tráfego de pacotes com tamanhos variáveis nas redes com topologia MS-16 e MS-25, com diferentes graus de

conectividade e roteamentos. Observou-se que a capacidade útil da rede e a qualidade do serviço foi praticamente a mesma encontrada nas simulações do PCIV.

Estes resultados são importantes para se analisar como a rede se comporta em termos de ANH, Atraso médio (Am) e PLF para diferentes tráfegos PVIV e PCIV. Portanto, para regiões em que a demanda por melhor capacidade da rede e garantia a qualidade de serviços como, por exemplo, centros comerciais, é necessário que sejam configuradas redes com maior conectividade.

Todos esses resultados obtidos nas simulações são importantes para entendermos como a rede óptica com chaveamento fotônico (PSN) se comporta em termos dos parâmetros relevantes escolhidos (ANH, Atraso médio (Am) e PLF) nos diferentes tráfegos PVIV e PCIV. Comparando com a Tabela 2.3 do Cap.02, observa-se que os tempos de conexão e trânsito na rede PSN são ordens de grandeza inferiores, resultando portanto no ganho de tempo, na eficiência e na vazão das redes convergentes wireless-óptica.

Nota-se que quando o *e-buffer* é adicionado na rede o número de pacotes que circulam na rede é maior do que sem o *e-buffer*, o que influencia no aumento do Atraso médio (Am) para as redes com menor conectividade como no caso da rede de nos de grau 2 e híbrida.

Esta análise mostra que para se ter um ganho de desempenho da rede, a opção de aumentar a conectividade é melhor do que aumentar o tamanho da rede (número de nós). Portanto, para regiões que demandam por melhores capacidade da rede e garantia na qualidade de serviços, por exemplo, grandes centros comerciais, é necessário que sejam configuradas redes com maior conectividade.

Referências

- [5.1] F. R. Barbosa, “Redes Óticas” – curso de pós-graduação, FEEC – Unicamp – SP, Disponível em: <http://www.dsif.fee.unicamp.br/~rudge/>
- [5.2] I. B. Martins, “Análise de Desempenho e Proteção em Redes Óticas Convergentes com Chaveamento Fotônico”, Dissertação de Doutorado, FEEC/Unicamp, 2011
- [5.3] F. R. Barbosa, I. B. Martins, Y. Martins e E. Moschim, “Comparative Study of Latency and Throughput in OPS/OBS Metro Access Network”, *Networks’ 2014 – Madeira PT, Sept 2014.*
- [5.4] Y. Martins, F. R. Barbosa, I. B. Martins e E. Moschim, “Influence of Topology Connectivity for Transport in Optical Networks with Amplified Photonic Switches”, *Icton Graz 2014 –Austria PT, July 2014.*
- [5.5] Achille Pattavina, “Performance of deflection routing algorithms in IP optical transport networks” *J. Computer Networks: International Journal of Computer and Telecommunications Networking - Optical networks* ,Volume 50 Issue 2, 08 February 2006.
- [5.6] L.H.Bonani, “Proposta de Arquitetura Inovadora para Redes de Pacotes Óticos”, Tese Doutorado, FEEC-Unicamp, 2006.

6. Conclusão

Na presente tese foram realizados estudos para a avaliação da latência da rede, considerando os parâmetros tais como: número médio de saltos (ANH), o atraso médio de transmissão de pacotes ópticos (Am) e a fração de perda de pacotes (PLF). No cenário adotado foram utilizados diferentes tipos de tráfegos PCIV e PVIV em Redes Ópticas Avançadas em ambiente Metro-Acesso, pois a demanda para um melhor desempenho e qualidade de serviços é crescente.

No início do trabalho foi feito um breve estudo da evolução das telecomunicações sem fio, em particular das redes utilizadas pelos Celulares, e que são consideradas neste trabalho apenas como clientes das Redes Fotônicas.

O objetivo deste estudo é poder configurar a rede óptica de forma que atenda as necessidades de uma determinada região em termos de latência, qualidade de serviço e que não tenha um custo tão elevado. Na verdade é trazer para a rede fixa uma maior flexibilidade podendo ser ajustada as necessidades exigidas de acordo com o tráfego.

Para se ter uma análise mais próxima do cenário real utilizou-se o tráfego PVIV e tráfego PCIV como base para a análise do resultado obtido nas simulações. O tráfego PCIV é característico de redes OPS e seus resultados já foram analisados em outros trabalhos do grupo. Percebeu-se que os resultados obtidos para o ANH, Atraso médio e PLF tiveram comportamento semelhante tanto para tráfego PVIV quanto para o PCIV.

Observou-se que a comparação de redes ópticas com conectividade de grau 2 e grau 3 com arquiteturas regulares e com conectividade híbrida, o desempenho e o custo são distintos. As redes com conectividade de grau 3 possuem o melhor desempenho, em ANH, menor Atraso médio e PLF, no entanto, possuem um custo maior em termos de equipamentos e instalações. A rede híbrida analisada pode ter a

combinação de diferentes graus de conectividade, ou seja, o projeto da rede pode ter a combinação de grau 2 e grau 3 diferentemente da presente análise, permitindo assim flexibilidade no projeto e planejamento de rede. O que se mostra é que na composição da rede com nós de grau 2 e grau 3 pode se ter um equilíbrio entre o custo e o desempenho geral.

A presente análise com a inclusão do parâmetro de Atraso médio (A_m), juntamente com ANH e PLF contribuiu para uma melhor compreensão da dinâmica da rede e no planejamento de sua arquitetura.

Portanto, a rede pode ser configurada de acordo com o tráfego da região em análise, podendo oferecer uma estrutura mais adequada. Sendo assim, as empresas provedoras de serviços de telecomunicações terão um custo financeiro adequado ao implantar sua estrutura de rede, aumentando a competitividade no mercado oferecendo bom desempenho na utilização da rede através dos serviços e com custo financeiro justo a seus assinantes.

6.1. Trabalhos Futuros

Considerando o cenário e as tecnologias descritas nesta tese, será citado brevemente alguns dos problemas de planejamento de redes, que envolvem tanto as restrições físicas quanto problemas de camada de transporte que poderão ser estudados em trabalhos futuros.

Em geral, o tráfego nas redes ópticas é carregado em caminhos ópticos (*optical path*) que ocupam comprimentos de onda de transmissão em cada enlace. Os caminhos ópticos escolhidos pelo roteamento podem ser muito longos e as restrições físicas do sistema são acumulativas, afetando a QoT do sinal, podendo muitas vezes serem bloqueados por falta de qualidade na recepção dos dados, devido às altas taxas de *Bit Error Rate* (BERs), à interferência de sinais e SNR e outros.

Do ponto de vista de projeto de rede, é possível desenvolver protocolos que utilizem parâmetros de outras camadas para melhor desempenhar a sua função. Por exemplo, um protocolo de roteamento que baseado na relação sinal-ruído (SNR), pode escolher qual a melhor rota para transmitir o fluxo de dados de um cliente.

Outro assunto atual e pertinente é o roteamento baseado na otimização de espectral do sinal transportado. Neste caso é levado em consideração vários estudos referentes ao tipo de modulação, a possibilidade de conversões de modulação dentro da rede, e a qualidade do sinal.

Para este tipo de análise é essencial o gerenciamento dos nós por um plano de controle, pois a disponibilidade de banda e qualidade do sinal irá variar conforme a demanda do tráfego de dados.

6.2. Trabalhos Publicados

Conferências Internacionais:

- [1] Y. Martins, F. R. Barbosa, I. B. Martins e E. Moschim, “Influence of Topology Connectivity for Transport in Optical Networks with Amplified Photonic Switches”, *Icton 2014*, Graz – Austria, July 2014.
- [2] F. R. Barbosa, I. B. Martins, Y. Martins e E. Moschim, “Comparative Study of Latency and Throughput in OPS/OBS Metro Access Network”, *Networks’ 2014* – Madeira PT, Sept 2014.
- [3] I. B. Martins, Yara Martins, F. R. Barbosa, e E. Moschim, “Importance of Simulation tools to planning of Optical Network”, *ETOP’2015*, Bordeaux, France, June 2015.
- [4] F. R. Barbosa, Yara Martins, I. B. Martins, e E. Moschim, Analysis of Latency and Packet Loss in OPS/OBS Metro-Access Networks using Store-Forward and Deflection-Routing Protocols”, *Intl. Microwave and Optoelectronics Conference – IMOC’2015*, Recife, Brasil, Nov.2015.