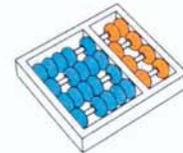


Carlos Alberto Astudillo Trujillo

**“Provisão de Qualidade de Serviço em Redes  
Integradas LTE-EPON”**

CAMPINAS  
2015





Universidade Estadual de Campinas  
Instituto de Computação

Carlos Alberto Astudillo Trujillo

## “Provisão de Qualidade de Serviço em Redes Integradas LTE-EPON”

Orientador(a): Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca  
Co-Orientador(a): Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Juliana Freitag Borin

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Instituto de Computação da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO DA DISSERTAÇÃO APRESENTADA À BANCA EXAMINADORA POR CARLOS ALBERTO ASTUDILLO TRUJILLO, SOB ORIENTAÇÃO DE PROF. DR. NELSON LUIS SALDANHA DA FONSECA.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Nelson Luis Saldanha da Fonseca".

Assinatura do Orientador(a)

CAMPINAS  
2015

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca do Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica  
Ana Regina Machado - CRB 8/5467

As89p Astudillo Trujillo, Carlos Alberto, 1985-  
Provisão de qualidade de serviço em redes integradas LTE-EPON / Carlos  
Alberto Astudillo Trujillo. – Campinas, SP : [s.n.], 2015.

Orientador: Nelson Luis Saldanha da Fonseca.  
Coorientador: Juliana Freitag Borin.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de  
Computação.

1. Sistemas de comunicação móvel. 2. Algoritmos de computador. 3. Redes  
ópticas passivas. 4. Qualidade de serviço (Redes de computadores). I. Fonseca,  
Nelson Luis Saldanha da, 1961-. II. Borin, Juliana Freitag, 1978-. III. Universidade  
Estadual de Campinas. Instituto de Computação. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Quality of service provisioning in LTE-EPON integrated networks

**Palavras-chave em inglês:**

Mobile communication systems

Computer algorithms

Passive optical networks

Quality of service (Computer networks)

**Área de concentração:** Ciência da Computação

**Titulação:** Mestre em Ciência da Computação

**Banca examinadora:**

Nelson Luis Saldanha da Fonseca [Orientador]

Miguel Elias Mitre Campista

Leandro Aparecido Villas

**Data de defesa:** 06-03-2015

**Programa de Pós-Graduação:** Ciência da Computação

## TERMO DE APROVAÇÃO

Defesa de Dissertação de Mestrado em Ciência da Computação, apresentada pelo(a) Mestrando(a) **Carlos Alberto Astudillo Trujillo**, aprovado(a) em **06 de março de 2015**, pela Banca examinadora composta pelos Professores(as) Doutores(as):



**Prof(a). Dr(a). Miguel Elias Mitre Campista**  
Titular



**Prof(a). Dr(a). Leandro Aparecido Villas**  
Titular



**Prof(a). Dr(a). Nelson Luis Saldanha da Fonseca**  
Presidente



# Provisão de Qualidade de Serviço em Redes Integradas LTE-EPON

Carlos Alberto Astudillo Trujillo<sup>1</sup>

6 de março de 2015

## Banca Examinadora:

- Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca (Orientador)
- Prof. Dr. Miguel Elias Mitre Campista  
GTA/COPPE/POLI - UFRJ
- Prof. Dr. Leandro Aparecido Villas  
Instituto de Computação - UNICAMP
- Prof. Dr. Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa  
GTA/COPPE/POLI - UFRJ (Suplente)
- Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Islene Calciolari Garcia  
Instituto de Computação - UNICAMP (Suplente)

---

<sup>1</sup>Suporte Financeiro: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) processo número 2012/10582-4, Santander Universities, CAPES, CNPq e INCT FOTONICOM



# Abstract

The increasing demand for mobile broadband access has motivated mobile network operators (MNOs) to deploy the long term evolution (LTE) technology, which allows the support of new services demanding large amount of bandwidth and strict QoS requirements. The growth of bandwidth demands will increase dramatically the number of base stations and the amount of traffic injected into the mobile backhaul (MBH) network. To cope with the high cost of MBH networks, passive optical networks (PONs) can be employed by using the already deployed fiber to anywhere (FTTx) systems. Moreover, the LTE base station, also known as evolved NodeB (eNB), can be integrated with the optical network unit (ONU) in a single device, called ONU-eNB, which competes for bandwidth with other ONUs in PONs. Such competition for bandwidth can jeopardize the support of mobile users' quality of service (QoS) requirements.

This dissertation proposes a QoS provisioning framework for LTE mobile networks employing Ethernet PON (EPON)-based backhaul. It also introduces a novel LTE scheduler with the aim of supporting QoS requirements as well as high throughput. The framework includes a functional architecture for the ONU-eNB, a QoS mapping scheme and a method to allow current LTE schedulers to take into account both information available from the mobile access network (LTE) and information from the backhaul network (EPON) in order to improve the overall network performance, specially when the backhaul link is congested. It is shown how the proposed framework can improve network utilization and quality of service provisioning in an integrated network even under variations of traffic load in the backhaul and in the LTE networks.



# Resumo

A crescente demanda por acesso banda larga móvel tem motivado a implantação da tecnologia *long term evolution* (LTE) pelas operadoras de redes móveis (MNOs), permitindo o fornecimento de novos serviços que demandam alta largura de banda e requisitos rigorosos de qualidade de serviço (QoS). Este aumento da demanda de banda passante leva à necessidade de um grande número de estações rádio base e ao aumento na quantidade de tráfego injetado no *backhaul* da rede móvel (MBH). Para lidar com os elevados custos do MBH, redes ópticas passivas (PONs) podem ser usadas para reduzir os custos do MBH usando sistemas *fiber to anywhere* (FTTx) já implantado bem como lidar com a crescente demanda por acesso banda larga à Internet por usuários móveis. Além disso, a estação rádio base LTE, também conhecida como *evolved NodeB* (eNB), pode ser integrada à unidade de rede óptica (ONU) das PONs em um dispositivo único, chamado ONU-eNB. A ONU-eNB compete pela largura de banda com outras ONUs em PONs, o que pode potencialmente prejudicar o fornecimento de QoS aos usuários móveis.

Esta dissertação propõe um *framework* para provisão de QoS em redes móveis LTE que empregam *backhaul* baseado em redes ópticas passivas Ethernet (EPONs). Propõe também, um escalonador para redes LTE com o objetivo de prover requisitos de QoS e melhorar a vazão total. O *framework* introduz uma arquitetura funcional para o dispositivo integrado ONU-eNB, um esquema de mapeamento de QoS e um método para permitir que os escalonadores LTE atuais possam levar em conta informações disponíveis da rede de acesso móvel (LTE) bem com informações sobre a rede de *backhaul* (EPON), a fim de melhorar o desempenho total da rede, especialmente quando o enlace de *backhaul* está congestionado. Mostra-se como a implementação do *framework* proposto melhora a utilização da rede e a provisão de QoS em uma rede integrada, mesmo sob variação da carga de tráfego no *backhaul* e na rede LTE.



*A mis papás, Elena y Carlos Julio, por su sacrificio, apoyo y amor incondicional.*

*A mis hermanos, Martha Elena e Diego Armando, por su amor y apoyo continuo.*



# Agradecimentos

Esta dissertação não teria sido possível sem a ajuda e suporte de muitas pessoas. Estas páginas estão aqui para agradecer a todos eles.

Agradeço primeiramente ao meu orientador, professor Nelson L.S. da Fonseca, pelos valiosos direcionamentos, pelas cuidadosas revisões dos artigos submetidos, dos projetos escritos e desta dissertação, pelo incentivo à excelência, pelo apoio constante nas minhas ideias, planos e decisões, pelo esforço em encontrar bolsas e recursos para que eu tivesse sempre o que precisasse na minha pesquisa, pela paciência em momentos difíceis durante essa caminhada e pela oportunidade de fazer pós-graduação neste belo país e me formar sob sua orientação. Você tem sido um excelente orientador e um modelo a seguir.

À professora Juliana Freitag Borin, pela valiosa ajuda durante esta etapa da minha vida, especialmente, no começo da minha pesquisa.

I would also like to thank Prof. Fabrizio Granelli for supporting me during my internship at the University of Trento. Agradezco también a Raúl Palacios por ser mi apoyo durante mi estadia em Trento.

Aos professores Leandro Aparecido Villas e Miguel Elias Mitre Campista por aceitarem estar na minha banca.

Ao Cesar Chaves, pelo acolhimento e suporte na minha chegada em Campinas, que virou uma forte amizade e convívio durante três anos. Agradeço também pelas lições de vida e o muito que me ensinou durante esses anos.

Ao Geraldo Magela, Andrei Braga, Alice Cordovil, Renata Dalmora pelo convívio na nossa república, pelo suporte e ajuda dada, especialmente, com o aprendizado da língua portuguesa e da cultura Brasileira. À Gaby Zemanate, Javier Luna, Diana Gonzalez, Luisa Suarez e Mauri Tumbajoy pelo convívio na minha segunda república e pela amizade. Ao Juan P. Pantoja, Luisa Tumbajoy, Felipe Chicaiza e Luis pela companhia na minha atual residência. Todos vocês são minha família em um país que escolhemos para desenvolver nossa vida profissional e contar com vocês no dia a dia aqui me faz sentir como se estivesse em casa. Vocês fizeram, sem dúvida alguma, que esta etapa da minha vida valesse a pena. Obrigado pessoal!

Ao Walisson Pereira, Eduardo Miranda e Atílio Gomes por serem mais do que colegas

de aula, amigos, e pelo suporte durante as longas horas de estudo durante o primeiro ano de mestrado.

Aos meus colegas do LRC, Esteban Rodriguez, Rafael Gomes, Helder Oliveira, Pedro Moura, Juliana de Santi, Gustavo Alkimim, Allison Potes, Milton Soares Jr., Neumar Malheiros, Luciano Chaves, Takeo Akabane, Guilherme Russi e Raphael Rosa pelo apoio no laboratório e por estar sempre disponíveis para me ajudar, para compartilhar seus conhecimentos comigo e para tirar as dúvidas diárias no laboratório. Obrigado também pela amizade brindada!

Ao Dick, por me oferecer uma grande amizade em momentos que realmente precisava de uma pessoa me apoiando.

Aos meus colegas de Sala, Julian, Vanessa, Eliana, Giovanni, Erick e Walisson por tornar melhor meu dia a dia no IC.

Ao Tiago Andrade, pelas discussões interessantes sobre nossos trabalhos e por compartilhar comigo seus conhecimentos. Agradeço também por se aproximar e me permitir participar do seu trabalho de doutorado.

Aos professores e demais funcionários do Instituto de Computação, por fazer com que o mestrado fosse muito gratificante.

Agradeço à FAPESP, Santander Universidades, CAPES, CNPq e INCT Fotonicom pelo apoio financeiro.

Agradezco al profesor Oscar Calderón, a quién le tengo un gran aprecio, por haber despertado en mí la pasión por la investigación. Agradezco también por enseñarme a encontrar temas interesantes de investigación, por enseñarme a pensar lógicamente, por incentivar-me a escribir siempre mejor. Agradezco también a los demás profesores de la Universidad del Cauca por la contribución en mi formación durante mi pregrado, pues me permitió llegar hasta aquí.

À Larissy e o Erick por oferecer sua amizade e suporte. Vocês me ensinaram o valor da amizade em um lugar muito longe das nossas famílias.

À Gabriela, minha namorada, por estar sempre ao meu lado, pela paciência e pelo apoio nos momentos mais difíceis do desenvolvimento desta dissertação e da minha estada no Brasil. Muito obrigado Hermosa!

Finalmente, pero no menos importante, agradezco a mis papás, Elena y Carlos Julio, por el amor incondicional y por el apoyo que desde niño me brindaron para que siempre tuviera la mejor educación e todo lo necesario para poder alcanzar mis metas. Agradezco también a mis hermanos, Martha Elena y Diego Armando, por su amor y cariño, por apoyarme en esta decisión y por cuidar de nuestros padres.

*“O cientista não é o homem que  
fornece as verdadeiras respostas; é  
quem faz as verdadeiras perguntas.”*

Claude Lévi-Strauss



# Sumário

Abstract	ix
Resumo	xi
Dedicatória	xiii
Agradecimentos	xv
Epigrafe	xvii
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Contribuições . . . . .	4
1.2 Produção científica . . . . .	4
1.3 Organização da dissertação . . . . .	5
<b>2 Referencial Teórico</b>	<b>7</b>
2.1 <i>Long term evolution</i> (LTE) . . . . .	7
2.1.1 Arquitetura de rede . . . . .	9
2.1.2 Protocolos da E-UTRAN . . . . .	10
2.1.3 Acesso múltiplo . . . . .	12
2.1.4 Camada física . . . . .	14
2.1.5 <i>Framework</i> de QoS . . . . .	15
2.1.6 Gerência de recursos de rádio (RRM) . . . . .	17
2.2 <i>Ethernet passive optical network</i> (EPON) . . . . .	20
2.2.1 Topologias da rede de distribuição óptica (ODN) . . . . .	21
2.2.2 Arquiteturas das redes ópticas passivas (PONs) . . . . .	22
2.2.3 <i>Multi-point control protocol</i> (MPCP) . . . . .	24
2.2.4 <i>Dynamic bandwidth allocation</i> (DBA) . . . . .	25
2.3 Redes <i>fiber-wireless</i> (FiWi) . . . . .	25
2.4 Resumo conclusivo . . . . .	26

<b>3</b>	<b>Provisão de QoS em Redes Móveis LTE no Sentido <i>Uplink</i></b>	<b>29</b>
3.1	Trabalhos relacionados . . . . .	30
3.2	Proposta de escalonador LTE <i>uplink</i> no domínio do tempo . . . . .	31
3.2.1	Algoritmo de escalonamento . . . . .	31
3.2.2	Função de prioridade . . . . .	32
3.2.3	Análise da complexidade . . . . .	36
3.3	Escalonamento no domínio da frequência . . . . .	36
3.3.1	Algoritmo de escalonamento . . . . .	37
3.3.2	Função de prioridade . . . . .	37
3.4	Avaliação de desempenho . . . . .	38
3.4.1	Cenário de simulação . . . . .	39
3.4.2	Resultados de simulação . . . . .	39
3.5	Resumo conclusivo . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Provisão de QoS em Redes Integradas LTE-EPON</b>	<b>53</b>
4.1	Trabalhos relacionados . . . . .	54
4.2	Arquitetura integrada . . . . .	56
4.3	<i>Framework</i> para provisão de QoS na rede integrada . . . . .	56
4.3.1	Arquitetura funcional do dispositivo ONU-eNB . . . . .	57
4.3.2	Esquema de mapeamento de QoS . . . . .	57
4.3.3	Método para consideração do estado do enlace de <i>backhaul</i> . . . . .	59
4.4	Estudo de caso . . . . .	61
4.5	Avaliação de desempenho . . . . .	62
4.5.1	Cenário de simulação . . . . .	63
4.5.2	Resultados de simulação . . . . .	64
4.6	Resumo conclusivo . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>73</b>
5.1	Considerações finais . . . . .	73
5.2	Sugestões para pesquisas futuras . . . . .	74
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>77</b>

# Lista de Figuras

1.1	Arquitetura típica de uma rede móvel [17] . . . . .	2
2.1	Arquitetura de rede 4G definida pelo 3GPP [6] . . . . .	9
2.2	Protocolos da E-UTRAN . . . . .	11
2.3	Espectro de frequência de seis subportadoras OFDM . . . . .	12
2.4	Comparação das técnicas de acesso múltiplo empregadas pela tecnologia LTE: OFDMA para <i>downlink</i> e SC-FDMA para <i>uplink</i> . . . . .	13
2.5	Grade de recursos em redes LTE . . . . .	14
2.6	Modos de duplexação na tecnologia LTE . . . . .	15
2.7	Escalonamento LTE em dois estágios . . . . .	19
2.8	Rede EPON utilizando TDM em direção <i>downstream</i> . . . . .	21
2.9	Rede EPON utilizando TDMA em direção <i>upstream</i> . . . . .	22
2.10	Topologias da ODN nas PONs . . . . .	23
2.11	Arquitetura integrada LTE-EPON . . . . .	27
3.1	Função <i>z-shaped</i> relaxada com parâmetros $a = 0,7$ e $b = 0,9$ . . . . .	34
3.2	Valor da métrica relacionada ao atraso para <i>bearers</i> GBR e nGBR em função do fator $x$ . . . . .	35
3.3	Taxa de perda de pacotes para o escalonador ZBQoS no domínio do tempo, o escalonador FME com métricas PF e MT no domínio da frequência, em função do número de usuários passados para o escalonador no domínio da frequência. . . . .	42
3.4	Atraso médio de pacotes para o escalonador ZBQoS no domínio do tempo, o escalonador FME com métricas PF e MT no domínio da frequência, em função do número de usuários passados para o escalonador no domínio da frequência. . . . .	44
3.5	Índice de Jain para o escalonador ZBQoS no domínio do tempo, o escalonador FME com métricas PF e MT no domínio da frequência, em função do número de usuários passados para o escalonador no domínio da frequência. . . . .	45

3.6	Taxa de perda de pacotes produzida pelos escalonadores ZBQoS e BQA, em função do número de usuários na célula. . . . .	47
3.7	Vazão média por <i>user equipment</i> (UE) produzida pelos escalonadores ZBQoS e BQA, em função do número de usuários na célula. . . . .	48
3.8	Atraso médio dos pacotes produzido pelos escalonadores ZBQoS e BQA, em função do número de usuários na célula. . . . .	49
3.9	Índice de Jain produzido pelos escalonadores ZBQoS e BQA, em função do número de usuários na célula. . . . .	51
4.1	Arquitetura funcional do dispositivo integrado ONU-eNB. . . . .	58
4.2	Valor da métrica de escalonamento para <i>bearers</i> GBR e nGBR em função da razão $x$ . . . . .	62
4.3	Taxa de perda de pacotes para tráfego de vídeo. . . . .	66
4.4	Vazão agregada para tráfego CBR. . . . .	66
4.5	Atraso médio de pacotes para o tráfego de vídeo. . . . .	67
4.6	Atraso médio de pacotes para o tráfego de VoIP. . . . .	68
4.7	Atraso médio de pacotes para o tráfego CBR. . . . .	68
4.8	Atraso médio de pacotes no <i>backhaul</i> para o tráfego de vídeo. . . . .	69
4.9	Atraso médio de pacotes para no <i>backhaul</i> o tráfego VoIP. . . . .	69
4.10	Atraso médio de pacotes no <i>backhaul</i> para o tráfego CBR. . . . .	70

# Lista de Tabelas

2.1	QCIs padronizados pelo 3GPP [3] . . . . .	16
3.1	Modelo de tráfego e requisitos de QoS dos usuários móveis da rede LTE. . . . .	40
3.2	Parâmetros de simulação para a rede LTE. . . . .	41
4.1	Modelo de tráfego e requisitos de QoS dos usuários móveis da rede integrada LTE-EPON. . . . .	64
4.2	Parâmetros de simulação para a rede integrada LTE-EPON. . . . .	65



# Lista de Algoritmos

1	Algoritmo ZBQoS . . . . .	33
2	Algoritmo FME modificado . . . . .	38



# Lista de Abreviaturas e Siglas

<b>2W-PON</b>	<i>Two-Upstream-Wavelength PON.</i>
<b>3G</b>	<i>Thrid Generation (Terceira Geração).</i>
<b>3GPP</b>	<i>Third Generation Parnetship Project (Projeto de Parceria da Terceira Geração).</i>
<b>4G</b>	<i>Fourth Generation (Quarta Geração).</i>
<b>AMBR</b>	<i>Agregated MBR (MBR Agregado).</i>
<b>ARP</b>	<i>Allocation and Retention Priority (Prioridade de Alocação e Retenção).</i>
<b>ARQ</b>	<i>Automatic Repeat Request.</i>
<b>AS</b>	<i>Access Stratum.</i>
<b>BPSK</b>	<i>Binary Phase-Shift Keying.</i>
<b>BQA</b>	<i>Bandwidth and QoS Aware.</i>
<b>BSC</b>	<i>Base Station Controller (Estação Base de Controle).</i>
<b>BSR</b>	<i>Buffer Status Report (Relatório do Estado do Buffer).</i>
<b>CA</b>	<i>Carrier Aggregation.</i>
<b>CBR</b>	<i>Constant Bit Rate.</i>
<b>CO</b>	<i>Central Office (Escritório Central).</i>
<b>CoMP</b>	<i>Coordinated MultiPoint.</i>
<b>CoS</b>	<i>Class of Service (Classe de Serviço).</i>

<b>CQI</b>	<i>Channel Quality Information.</i>
<b>CSG</b>	<i>Closed Subscriber Group.</i>
<b>CSI</b>	<i>Channel State Information.</i>
<b>CSMA/CD</b>	<i>Carrier-Sense Multiple Access with Collision Detection.</i>
<b>DBA</b>	<i>Dynamic Bandwidth Allocation (Alocação Dinâmica de Largura de Banda).</i>
<b>DSCP</b>	<i>DiffServ Code Point.</i>
<b>E-UTRA</b>	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access.</i>
<b>E-UTRAN</b>	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network.</i>
<b>eNB</b>	<i>evolved NodeB.</i>
<b>EPC</b>	<i>Evolved Packet Core.</i>
<b>EPON</b>	<i>Ethernet PON.</i>
<b>EPS</b>	<i>Evolved Packet System.</i>
<b>EWMA</b>	<i>Exponentially Weighted Moving Average.</i>
<b>FD</b>	<i>Frequency Domain (Domínio da Frequência).</i>
<b>FDD</b>	<i>Frequency-Division Duplexing.</i>
<b>FDPS</b>	<i>Frequency-Domain Packet Scheduler (Escalonador de Pacotes no Domínio da Frequência).</i>
<b>FIFO</b>	<i>First In-First Out.</i>
<b>FIWI</b>	<i>Fiber-Wireless (Fibra-Sem Fio).</i>
<b>FME</b>	<i>First Maximum Expansion.</i>
<b>FSO</b>	<i>Free Space Optics.</i>
<b>FTTA</b>	<i>Fiber To The Apartment.</i>
<b>FTTB</b>	<i>Fiber To The Building.</i>
<b>FTTC</b>	<i>Fiber To The Curb.</i>

<b>FTTCell</b>	<i>Fiber to the Cell.</i>
<b>FTTD</b>	<i>Fiber To The Desk.</i>
<b>FTTH</b>	<i>Fiber to the Home.</i>
<b>FTTN</b>	<i>Fiber To The Node.</i>
<b>FTTx</b>	<i>Fiber to Anywhere.</i>
<b>GBR</b>	<i>Guaranteed Bit Rate</i> (Taxa de Bit Garantida).
<b>gGIANT</b>	<i>group-GIgaPon Access NeTwork.</i>
<b>GPON</b>	<i>Gigabit PON.</i>
<b>GTP</b>	<i>GPRS Tunneling Protocol.</i>
<b>H2H</b>	<i>Human to Human.</i>
<b>HARQ</b>	<i>Hybrid Automatic Repeat Request.</i>
<b>HeNB</b>	<i>Home eNB.</i>
<b>HetNet</b>	<i>Heterogeneous Network.</i>
<b>HoL</b>	<i>Head-of-the-Line</i> (Cabeça da Fila).
<b>HRAN</b>	<i>High RAN.</i>
<b>HSS</b>	<i>Home Subscriber Server.</i>
<b>HZBQoS</b>	<i>Hybrid Z-Based QoS Scheduler.</i>
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos).
<b>IMT-A</b>	<i>International Mobile Telecommunications Advanced.</i>
<b>IP</b>	<i>Internet Protocol.</i>
<b>IPACT</b>	<i>Interleaved Polling with Adaptive Cycle Time.</i>
<b>IPTV</b>	<i>Internet Protocol Television.</i>

<b>ITU</b>	<i>International Telecommunication Union</i> (União Internacional de Telecomunicações).
<b>LMA</b>	<i>Local Mobility Anchor</i> .
<b>LRAN</b>	<i>Low RAN</i> .
<b>LRC</b>	<i>Laboratório de Redes de Computadores</i> .
<b>LTE</b>	<i>Long Term Evolution</i> .
<b>LTE-A</b>	<i>LTE-Advanced</i> .
<b>M2M</b>	<i>Machine to Machine</i> .
<b>MAC</b>	<i>Medium Access Control</i> (Controle de Acesso ao Meio).
<b>MBH</b>	<i>Mobile BackHaul</i> (Backhaul da Rede Móvel).
<b>MBR</b>	<i>Maximum Bit Rate</i> (Taxa Máxima de Bit).
<b>MC-SA</b>	<i>Multiple Channel Scheduling Algorithm</i> .
<b>MIMO</b>	<i>Multiple Input-Multiple Output</i> .
<b>MME</b>	<i>Mobility Management Entity</i> (Entidade de Gerência de Mobilidade).
<b>mmWave</b>	<i>Millimeter Wave</i> .
<b>MNO</b>	<i>Mobile Network Operator</i> (Operadora de Rede Móvel).
<b>MPCP</b>	<i>Multi-Point Control Protocol</i> (Protocolo de Controle Multi-Ponto).
<b>MSO</b>	<i>Multiple-System Operator</i> (Operadora de Cabo).
<b>MT</b>	<i>Maximum Throughput</i> .
<b>MTC</b>	<i>Machine-Type Communications</i> (Comunicação entre Máquinas).
<b>NAS</b>	<i>Non Access Stratum</i> .
<b>nGBR</b>	<i>non-GBR</i> (não-GBR).
<b>ODN</b>	<i>Optical Distribution Network</i> (Rede de distribuição óptica).

<b>OFDM</b>	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i> (Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal).
<b>OFDMA</b>	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i> (Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência Ortogonal).
<b>OLT</b>	<i>Optical Line Terminal</i> (Terminal de Linha Óptica).
<b>ONU</b>	<i>Optical Network Unit</i> (Unidade de Rede Óptica).
<b>P-GW</b>	<i>Packet GateWay</i> (Gateway de Pacotes).
<b>P2P</b>	<i>Peer-to-Peer</i> .
<b>PAPR</b>	<i>Peak to Average Power Ratio</i> .
<b>PCRF</b>	<i>Policy Control and Charging Rules Function</i> .
<b>PDB</b>	<i>Packet Delay Budget</i> (Orçamento de Atraso do Pacote).
<b>PDCCH</b>	<i>Packet Downlink Control CHannel</i> .
<b>PDCP</b>	<i>Packet Data Convergence Protocol</i> .
<b>PDU</b>	<i>Protocol Data Unit</i> (Unidade de Dados de Protocolo).
<b>PELR</b>	<i>Packet Error Loss Ratio</i> (Taxa de Perda de Pacotes de Erro).
<b>PF</b>	<i>Proportional Fair</i> .
<b>PLR</b>	<i>Packet Loss Ratio</i> (Taxa de Perdas de Pacotes).
<b>PON</b>	<i>Passive Optical Networking</i> .
<b>PON</b>	<i>Passive Optical Network</i> (Rede Óptica Passiva).
<b>PRB</b>	<i>Physical Resource Block</i> (Bloco de Recursos Físicos).
<b>PS</b>	<i>Packet Scheduling</i> (Escalonamento de Pacotes).
<b>PUCCH</b>	<i>Packet Uplink Control CHannel</i> .
<b>PWS</b>	<i>Public Warning Systems</i> (Sistemas de Emergência Pública).
<b>QAM</b>	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> .

<b>QCI</b>	<i>QoS Class Identifier</i> (Identificador de Classe de QoS).
<b>QoS</b>	<i>Quality of Service</i> (Qualidade de Serviço).
<b>QPSK</b>	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> .
<b>R&amp;F</b>	<i>Radio and Fiber</i> (Rádio e Fibra).
<b>RAC</b>	<i>Radio Admission Control</i> (Controle de Admissão Rádio).
<b>RAN</b>	<i>Radio Access Network</i> (Rede de Acesso via Rádio).
<b>RAU</b>	<i>Remote Antenna Unit</i> (Unidade de Antena Remota).
<b>RB</b>	<i>Resource Block</i> (Bloco de Recurso).
<b>RBG</b>	<i>Radio Bearer Group</i> (Grupo de Bearers Rádio).
<b>RF</b>	<i>Rádio Frequência</i> .
<b>RLC</b>	<i>Radio Link Control</i> .
<b>RNC</b>	<i>Radio Network Controller</i> (Controlador da Rede via Rádio).
<b>ROCH</b>	<i>Robust Header Compression</i> .
<b>RoF</b>	<i>Radio over Fiber</i> (Rádio sobre Fibra).
<b>RRC</b>	<i>Radio Resource Control</i> .
<b>RRM</b>	<i>Radio Resource Management</i> (Gerência de Recurso Rádio).
<b>RTT</b>	<i>Round Trip Time</i> (Tempo de Ida e Volta).
<b>S-GW</b>	<i>Service GateWay</i> (Gateway de Serviço).
<b>SAE</b>	<i>System Architecture Evolution</i> .
<b>SC-FDMA</b>	<i>Single-Carrier FDMA</i> .
<b>SC-SA</b>	<i>Single Channel Scheduling Algorithm</i> .
<b>SDF</b>	<i>Service Data Flows</i> (Fluxos de Dados de Serviço).
<b>SDU</b>	<i>Service Data Unit</i> (Unidade de Dados de Serviço).
<b>SLA</b>	<i>Service Level Agreement</i> (Acordo de Nível de Serviço).

<b>SON</b>	<i>Self Organized Networks.</i>
<b>TD</b>	<i>Time Domain (Domínio do Tempo).</i>
<b>TDD</b>	<i>Time-Division Duplexing.</i>
<b>TDM</b>	<i>Time-Division Multiplexing (Multiplexação por Divisão de Tempo).</i>
<b>TDM-PON</b>	<i>Time-Division Multiplexing PON.</i>
<b>TDMA</b>	<i>Time-Division Multiple Access (Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo).</i>
<b>TTI</b>	<i>Transmission Time Interval (Intervalo de Tempo de Transmissão).</i>
<b>UDP</b>	<i>User Datagram Protocol.</i>
<b>UE</b>	<i>User Equipment.</i>
<b>UMTS</b>	<i>Universal Mobile Telecommunication System.</i>
<b>VHDSL</b>	<i>Very-High-Bit-Rate Digital Subscriber Line.</i>
<b>VoD</b>	<i>Video over Demand (Vídeo sob Demanda).</i>
<b>VoIP</b>	<i>Voice over IP (Voz sobre IP).</i>
<b>WiMAX</b>	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access.</i>
<b>XGPON</b>	<i>10-gigabit-capable PON.</i>
<b>ZBQoS</b>	<i>Z-Based QoS Scheduler.</i>



# Capítulo 1

## Introdução

Ao longo dos últimos anos, as redes de telefonia celular têm experimentado um aumento sem precedentes na demanda por largura de banda e necessidade de prover requisitos de qualidade de serviço (QoS) mais rigorosos, o que impõe grandes desafios para as operadoras de redes móveis (MNOs). Este cenário se dá por diversos motivos [36],[26], entre eles: (i) o aumento do número de dispositivos móveis como *tablets*, *laptops* e, principalmente, *smartphones*, que em 2015 superarão em número a população mundial [26]; (ii) um número de usuários móveis cada vez maior interessados em aplicações *peer-to-peer* (P2P), jogos *on-line*, redes sociais, aplicações intensivas de dados tais como aplicações em nuvens, e serviços e aplicações multimídia tais como videoconferência, *streaming* de vídeo, *internet protocol television* (IPTV) e vídeo sob demanda (VoD) [26]; (iii) mudanças drásticas nos hábitos de consumo dos usuários móveis [26].

Este cenário motivou a implementação da tecnologia *long term evolution* (LTE) pelas MNOs em inúmeros países, sendo esta uma transição incremental em direção à tecnologia *LTE-advanced* (LTE-A), que fornece ainda maiores taxas de transmissão apesar de usarem a mesma infraestrutura da rede LTE. A tecnologia LTE foi proposta pelo projeto de parceria da terceira geração (3GPP) como a evolução da tecnologia 3G conhecida como *universal mobile telecommunication system* (UMTS), visando uma tecnologia de comunicação móvel de ponta, que oferecesse altas taxas de transmissão de dados, melhoras significativas na cobertura e, principalmente, na experiência de usuário, com relação às gerações anteriores de redes celulares. Para atender essa grande demanda por banda larga móvel, as operadora precisam instalar estações rádio base LTE, conhecidas como *evolved NodeBs* (eNBs), e aumentar a sua quantidade em relação ao número de estações base implementadas de terceira geração (3G), pois uma das abordagens mais promissoras para atender essa grande demanda é utilizar além das macro células, células pequenas nas quais se transmite com menor potência (*smallcells* - micro, pico e femto células). As células pequenas possuem reduzida área de cobertura por eNB, e conseqüentemente um

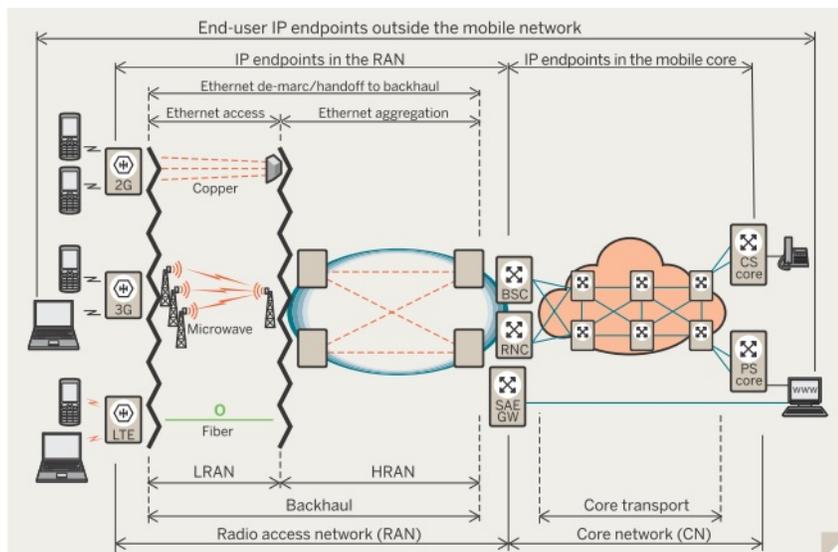


Figura 1.1: Arquitetura típica de uma rede móvel [17]

número significativo de estações base é necessário. Este fato é melhor conhecido como densificação da rede [13]. Por exemplo, em 2020, a rede da operadora de telefonia móvel Japonesa NTT DoCoMo vai crescer muito além das 80.000 estações rádio base atualmente instaladas [40]. Além do grande aumento na quantidade, cada eNB pode oferecer taxas máximas no sentido *downlink* de até 150 Mb/s em LTE e 1 Gb/s em LTE-A, e metade desses valores no sentido *uplink*, o que implica em uma grande quantidade de tráfego no *backhaul* da rede móvel (MBH).

O MBH é a infraestrutura de rede que interconecta as estações rádio base (eNBs) com o núcleo de rede da operadora. O MBH também interconecta os eNBs. A rede *backhaul* pode utilizar vários tipos de tecnologias, com diferentes meios de transmissão, como cobre, micro-ondas e fibra óptica. A arquitetura típica de uma rede móvel é apresentada na Figura 1.1. A rede *backhaul* abrange a parte da infraestrutura conhecida como rede de acesso ou *low RAN* (LRAN) e *high RAN* (HRAN) ou rede metropolitana. Na HRAN, podem ser encontradas tecnologias como SONET/SDH, MetroEthernet/CarrierEthernet e IP/MPLS. Já na LRAN, são tipicamente empregadas tecnologias tais como *worldwide interoperability for microwave access* (WiMAX), *very-high-bit-rate digital subscriber line* (VHDSL), fibra óptica ponto a ponto e enlaces TDM baseados em tecnologia comutada por circuitos (E1s ou T1s). Nesta dissertação, o MBH, quando discutido no contexto de redes ópticas passivas (PONs), refere-se exclusivamente à rede de acesso ou LRAN.

O custo do MBH será bastante alto, mas pode ser reduzido com o uso de infraestrutura de rede já existente, como sistemas *fiber to anywhere* (FTTx) baseados em *passive optical networking* (PON) [51]. Esta tecnologia permite aos MNOs reduzir os custos enquanto

conseguem lidar com a demanda crescente por largura de banda no MBH. Espera-se que a utilização da tecnologia PON no MBH gere oportunidades de negócios na escala de bilhões de dólares [31]. PON é a tecnologia predominante nas redes de acesso de banda larga fixa baseadas em *fiber to the home* (FTTH) [27]. Existem mais de 200 milhões de assinantes FTTx no mundo inteiro, e esse mercado continua crescendo [35]. Atualmente, os principais padrões para redes baseadas em TDM-PON são *Ethernet PON* (EPON) e *gigabit PON* (GPON), dos quais EPON possui a maior penetração entre os provedores de serviço de banda larga fixa, especialmente na Ásia, onde se encontra a maior parte dos assinantes FTTx do mundo. Além disto, este novo tipo de aplicação da tecnologia PON, conhecida como *fiber to the cell* (FTTCell), pode ser utilizado pelas operadoras de rede de acesso e operadoras de cabo (MSOs) para ampliar sua oferta de serviços, aumentar o valor das suas redes, aumentar a receita ou o retorno do investimento (ROI).

Dada a ampla implantação de TDM-PONs, mais especificamente as EPONs, e a tendência que esta tecnologia vai continuar a dominar as redes de acesso no futuro próximo [33], uma solução atraente é usar TDM-PONs como *backhaul* das redes móveis 4G e 5G, tanto para macro células como para *smallcells*. Embora outras tecnologias tenham sido consideradas para o *backhaul* de *smallcells* em redes 4G e 5G, tais como *millimeter wave* (mmWave) ou *free space optics* (FSO), as macro células continuarão utilizando *backhaul* óptico, pois é a única tecnologia capaz de suportar o rápido crescimento da demanda por largura de banda na rede de acesso via rádio (RAN) [28]. Além disto, o tráfego do *backhaul* sem fio das células de pequena cobertura será agregado no *backhaul* das macro células mais próximas, aumentando ainda mais a capacidade requerida no *backhaul* das macro células [28].

Neste novo cenário, uma estação rádio base LTE é uma usuária da TDM-PON. A rede considerada nesta dissertação é uma arquitetura integrada, chamada LTE-EPON, onde a unidade de rede óptica (ONU) e a estação rádio base são integradas em um único dispositivo, conhecido como ONU-eNB. Nessas redes integradas LTE-EPON, o dispositivo ONU-eNB compete por largura de banda com outros dispositivos ópticos (*i.e.*, ONU e ONU-eNB), além disso, a largura de banda disponível pode variar dependendo da carga da rede. Embora as redes EPON permitam garantir para cada cliente (ONU) uma determinada largura de banda, seguindo um acordo de nível de serviço (SLA), o tamanho do *grant* alocado para uma ONU, em um determinado instante, pode não ser suficiente para garantir os requisitos de QoS dos fluxos nas suas filas de transmissão *upstream*.

O objetivo desta dissertação é estudar o problema de provisão de QoS em redes LTE integradas com redes EPON, nas quais um eNB e uma ONU se encontram integradas em um único dispositivo ONU-eNB.

No restante deste capítulo, resumem-se as principais contribuições desta dissertação (Seção 1.1), listam-se as publicações dos resultados da pesquisa desenvolvida (Seção 1.2)

e finalmente, delinea-se a organização da dissertação (Seção 1.3).

## 1.1 Contribuições

As principais contribuições desta dissertação são:

- Proposta de um esquema genérico para a provisão de QoS em redes integradas LTE/EPON, independente da rede EPON implantada pela operadora de rede e compatível com os padrões LTE e EPON.
- Introdução de uma nova classe de mecanismos de escalonamento para redes LTE, que leva em consideração informações da rede sem fio bem como as do *backhaul*, para fazer seleção de usuários e alocação dos recursos de rádio.
- Proposta de um escalonador de tráfego *uplink* em redes LTE com provisão de requisitos de QoS. Este escalonador faz priorização dinâmica de usuários e se adapta às condições de carga da rede LTE para melhorar a vazão total de rede, enquanto mantém os requisitos de QoS das diferentes aplicações de usuário. Além disto, este escalonador é compatível com o padrão LTE.
- Estudo do impacto da métrica do escalonador no domínio da frequência e da cardinalidade do conjunto de usuários passado para o mesmo, na provisão de QoS no sentido *uplink* em redes LTE.

## 1.2 Produção científica

Os resultados apresentados nesta dissertação geraram as seguintes publicações:

### Artigos em periódicos

- Carlos A. Astudillo and Nelson L. S. da Fonseca. Standard-compliant QoS provisioning scheme for LTE/EPON integrated networks. *Wireless Communications, IEEE*, 21(3):44–51, June 2014 (Capítulo 4).

### Artigos em anais de conferências e workshops

- Carlos A. Astudillo, Juliana Freitag Borin, and Nelson L. S. da Fonseca. Impacto de critérios de projeto de escalonadores LTE uplink na qualidade de serviço. In *Anais do IV Workshop de Redes de Acesso em Banda Larga (WRA)*, May 2014 (Capítulo 3).

- Carlos A. Astudillo, Nelson L.S. da Fonseca, and Juliana Freitag Borin. LTE scheduler for LTE/TDM-EPON integrated networks. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2014 IEEE*, pages 1409–1414, April 2014 (Capítulo 4).
- Carlos A. Astudillo, Juliana Freitag Borin, and Nelson L.S. da Fonseca. LTE time-domain uplink scheduler for QoS provisioning. In *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2013 IEEE*, pages 1458–1463, December 2013 (Capítulo 3).

Além das contribuições principais desta dissertação, outras pesquisas foram realizadas em colaboração com outros pesquisadores enquanto este trabalho foi escrito. Estas pesquisas focam no estudo do impacto de usuários *machine to machine* (M2M) nos usuários tradicionais *human to human* (H2H) das redes celulares e em mecanismos para mitigar esses efeitos, principalmente os mecanismos de acesso aleatório para redes LTE/LTE-A. Como resultado dessas colaborações, foram publicados os seguintes artigos:

### Outros artigos

- Tiago P. C. de Andrade, Carlos A. Astudillo, and Nelson L. S. da Fonseca. The impact of massive machine type communication devices on the access probability of human-to-human users in LTE-based networks. In *IEEE Latin America Conference on Communications (Latincom)*, pages 1–6, November 2014.
- Tiago P. C. de Andrade, Carlos A. Astudillo, and Nelson L. S. da Fonseca. Random access mechanism for RAN overload control in LTE/LTE-A networks. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–6, June 2015.

## 1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte maneira. O Capítulo 2 fornece conceitos básicos para a compreensão da dissertação, tais como o funcionamento e arquitetura das redes LTE e EPON e seus *frameworks* para provisão de QoS. Detalha-se o funcionamento do algoritmo *interleaved polling with adaptive cycle time* (IPACT), o qual é utilizado para alocação de recursos *upstream* na rede EPON. Discutem-se as arquiteturas para redes fibra-sem fio (FIWI) e as principais características das redes integradas LTE-EPON. O Capítulo 3 introduz um escalonador LTE para o sentido *uplink* e apresenta os resultados da avaliação do seu desempenho. Este capítulo apresenta também um estudo sobre o impacto de alguns critérios de projeto do escalonador LTE proposto na provisão de QoS. O Capítulo 4 propõe um *framework* para provisão de QoS em redes integradas LTE-EPON

composto por uma arquitetura funcional para dispositivos integrados ONU-eNB, um esquema de mapeamento de QoS entre redes LTE e EPON, e um método para modificar escalonadores LTE existentes de forma a lidar com enlaces de *backhaul* não ideais baseados em EPON. Mostram-se, também, os benefícios da aplicação do *framework* proposto, usando como base o escalonador LTE introduzido no Capítulo 3. Por fim, o Capítulo 5 apresenta considerações finais sobre os trabalhos realizados e os futuros trabalhos que podem ser feitos a partir dos resultados obtidos nesta dissertação.

# Capítulo 2

## Referencial Teórico

Este capítulo apresenta os fundamentos básicos sobre as tecnologias LTE (Seção 2.1) e EPON (Seção 2.2), incluindo seus *frameworks* para provisão de QoS, escalonamento e alocação de recursos. Descrevem-se as diferentes arquiteturas propostas para a integração de redes ópticas e redes sem fio (Seção 2.3). Por fim, resume-se o conteúdo apresentado e o relaciona com os próximos capítulos desta dissertação (Seção 2.4).

### 2.1 *Long term evolution (LTE)*

Motivado pelo incremento na demanda de serviços de telecomunicações em banda larga móvel, que requerem altas taxas de dados e qualidade de serviço, em 2005, o 3GPP começou a trabalhar em dois projetos paralelos chamados *long term evolution (LTE)* e *system architecture evolution (SAE)*, a fim de traçar o caminho da evolução do sistema de telefonia móvel celular de 3G conhecido como UMTS, que então estava apenas começando a ser implementado pelas MNOs. Desde a concepção dessa geração de redes móveis, a demanda por maiores taxas de dados em redes móveis já estava sendo prevista.

Enquanto o LTE englobava a evolução da RAN (incluindo a interface rádio), SAE abrangia todos os aspectos da evolução do sistema não referentes a questões da utilização do rádio (*i.e.*, núcleo da rede).

Alguns dos requisitos definidos pelo 3GPP para esse projetos foram:

- Taxas de pico de 100 Mb/s em *downlink* e 50 Mb/s em *uplink*;
- Melhora na capacidade do sistema em relação ao *release 6* do 3GPP;
- Latência de 10 ms na rede móvel;
- Melhora da eficiência espectral;

- Interoperabilidade com rede 3GPP e não 3GPP;
- Largura de banda escalável de até 20 MHz;
- Arquitetura totalmente baseada em comutação de pacotes;
- Velocidade de até 350 km/h.

Em 2008, como resultados desses projetos, o *release 8* do 3GPP especificou o *evolved packet core* (EPC), a *evolved universal terrestrial radio access network* (E-UTRAN) e a *evolved universal terrestrial radio access* (E-UTRA), que correspondem ao núcleo da rede, à rede de acesso via rádio e à interface aérea, respectivamente. Esses três compõem o que hoje se conhece como *evolved packet system* (EPS). Outras especificações foram acrescentadas depois, no *release 9*, para aprimorar algumas funções especificadas no *release 8* e incluir outras novas. As principais funções e características definidas no *release 9* são: (i) suporte para sistemas de emergência pública (PWS), (ii) métodos de posicionamento melhorados, (iii) suporte de transmissão *broadcast*, (iv) melhoramento no suporte à tecnologia *multiple input-multiple output* (MIMO), (v) suporte melhorado para células de pequena cobertura, e (vi) suporte melhorado para *closed subscriber group* (CSG). Esses dois *releases* definem a tecnologia conhecida comumente como LTE.

Em dezembro de 2009, TeliaSonera, uma das maiores operadoras móveis da Finlândia, lançou a primeira rede LTE comercial. Porém, foi somente em setembro de 2010, quando o primeiro *smartphone* com suporte à LTE foi lançado no mercado, que o serviço LTE ficou realmente disponibilizado, pois até então, o serviço era somente fornecido através de modem USB.

Posteriormente, os *releases 10* e *11* definiram a tecnologia denominada LTE-Advanced [6]. O LTE-Advanced baseia-se na tecnologia LTE e suporta até cinco vezes mais largura de banda através de uma técnica chamada *carrier aggregation* (CA). Além disso, o LTE-Advanced introduz algumas melhorias na interface de rádio e no núcleo da rede para prover o novo tipo de comunicação conhecido como comunicação entre máquinas (MTC), e novas técnicas para melhorar o desempenho, especialmente na borda da célula, tais como *coordinated multipoint* (CoMP). O LTE-Advanced foi proposto para suprir os requisitos necessários para um sistema de comunicação móvel de quarta geração (4G), como definido pelo programa *international mobile telecommunications advanced* (IMT-A) da união internacional de telecomunicações (ITU), sendo ratificada como tecnologia para a prestação dos serviços móveis de 4G pela ITU em novembro de 2010 [65].

No início de 2014, a South Korea (SK) Telecom foi a primeira MNO a oferecer conectividade 4G utilizando a tecnologia LTE-A, com velocidade de até 150 Mb/s, agregando duas portadoras de 10 MHz em duas faixas de frequência diferentes [32].

### 2.1.1 Arquitetura de rede

A arquitetura para redes 4G, como definida pelo 3GPP, introduz uma mudança significativa, pois passa de uma arquitetura 3G baseada em comutação de circuitos para uma arquitetura baseada em comutação de pacotes IP. As redes móveis 3G empregam redes comutadas por circuitos no núcleo e no *backhaul* da rede. As redes 3.5G empregam redes híbridas, nas quais a comutação de circuitos é utilizada para serviços baseados em voz, e a comutação de pacotes para serviços de dados e multimídia. Isto implica em custos elevados por ter que manter duas redes diferentes dentro da mesma arquitetura ou por ter que utilizar os custosos enlaces TDM baseados em E1s ou T1s. Entretanto, as redes LTE utilizam uma arquitetura *flat*, na qual os serviços de voz, vídeo e dados podem ser provisionados sobre a mesma infraestrutura de rede baseada no protocolo IP. A figura 2.1 mostra a arquitetura de um sistema de comunicação móvel 4G baseado na tecnologia LTE. Esta arquitetura está dividida em três domínios: EPC, E-UTRAN e *user equipment* (UE).

O EPC é responsável pelo controle dos UEs e pelo estabelecimento dos *bearers*, que são entidades lógicas definidas para prover QoS, enquanto a E-UTRAN fornece a interface aérea com as terminações dos protocolos no plano de controle e no plano de dados para o UE e a comunicação entre os UEs e o EPC.

As principais entidades do EPC são: a entidade de gerência de mobilidade (MME), a gateway de serviço (S-GW) e a gateway de pacotes (P-GW). A MME é responsável pelo controle da sinalização entre o UE e o EPC, usando os protocolos chamados de *non access stratum* (NAS). Entre suas funções encontram-se a seleção da S-GW e da P-GW. A S-GW transfere todo o tráfego dos UEs e atua como *local mobility anchor* (LMA) para os *bearers* durante o *handoff*. A P-GW é responsável pela alocação de endereços IP aos usuários e também pela aplicação de políticas de QoS ao tráfego com destino aos UEs.

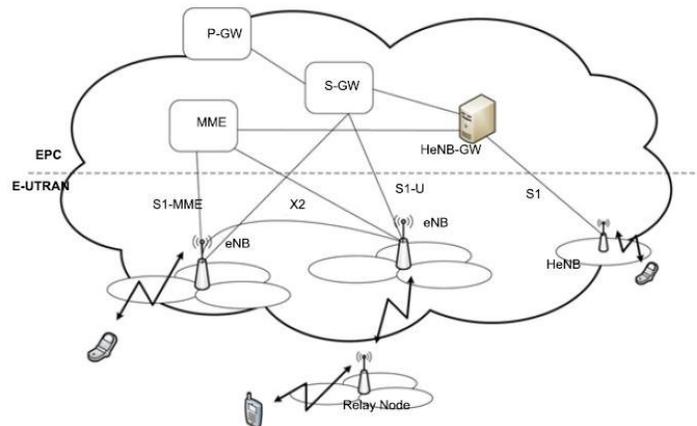


Figura 2.1: Arquitetura de rede 4G definida pelo 3GPP [6]

Além destas entidades, o EPC também tem a *policy control and charging rules function* (PCRF) e o *home subscriber server* (HSS). A PCRF é a encarregada pela tomada de decisões das políticas e pelo controle dos fluxos da rede. Esta entidade é a encarregada de fornecer as informações relacionadas com o identificador de classe de QoS (QCI) e o parâmetro taxa de bit garantida (GBR). O HSS é a base de dados dos usuários e provê os perfis de usuário e restrições de *roaming*.

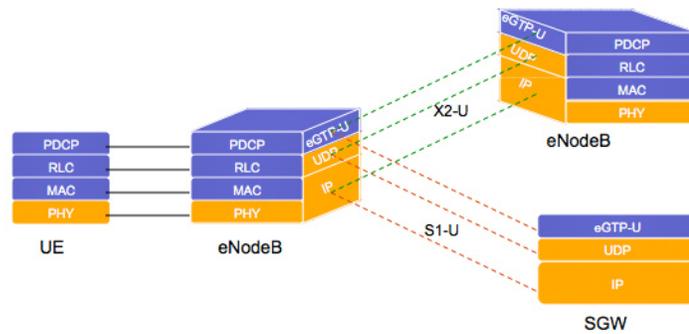
A E-UTRAN é composta de entidades de rede chamadas eNBs, que representam as estações rádio base da rede móvel. O eNB possui todas as funcionalidades da rede de acesso, fornecendo conectividade entre os UEs e o EPC da rede LTE. Diferente das redes 3G, nas quais uma entidade centralizada chamada controlador da rede via rádio (RNC) divide as tarefas da RAN com as estações rádio base, nas redes LTE não existe um controlador centralizado e todo o processamento é distribuído entre os eNBs. Nesta arquitetura, os eNBs comunicam-se [34] (i) entre si através da interface X2, (ii) com o EPC através da interface S1, especificamente, com o MME através da interface S1-MME e com o S-GW através da interface S1-U, e (iii) com os UEs através da interface LTE-Uu, que implementa os protocolos conhecidos como *access stratum* (AS). Tanto a interface X2 como a S1 precisam ser suportadas pelo *backhaul* da rede móvel. Finalmente, o UE é a entidade que permite ao usuário ter acesso aos serviços provisionados pela rede.

Adicionalmente, o 3GPP definiu o *home eNB* (HeNB), conhecido como fento-células, que é um eNB de baixo custo para melhorar a cobertura da rede móvel em escala *indoor*. O HeNB se conecta ao EPC através do HeNB-GW e utiliza faixas de frequência licenciadas para o acesso dos usuários móveis. Uma característica especial do HeNB é que ao invés de utilizar o *backhaul* da MNO, a conexão entre o HeNB e o EPC é realizada utilizando a rede residencial do assinante. Além disto, o 3GPP considera a possibilidade de usar nós *relay*, que melhoram o desempenho da rede na borda da célula e em lugares com sinal fraco ou ausente da macro célula, porém dentro da área de cobertura. Com a utilização de HeNBs e nós *relay*, objetiva-se aumentar a cobertura da rede, alcançar altas taxas de transmissão e melhorar a provisão de QoS.

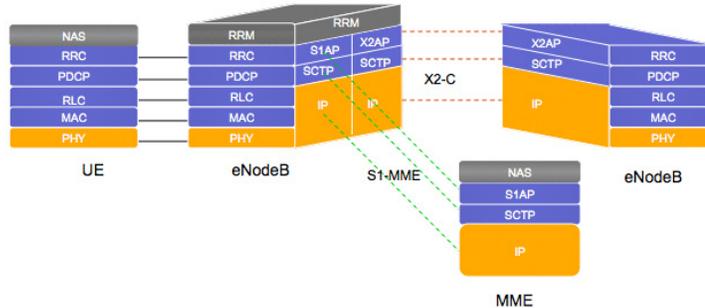
### 2.1.2 Protocolos da E-UTRAN

Os protocolos da E-UTRAN estão divididos em dois grandes grupos: protocolos do plano de usuário e protocolos do plano de controle. Estes protocolos abrangem as camadas física, de enlace de dados e de rede (figura 2.2). A camada de enlace de dados encontra-se subdividida em três subcamadas: *packet data convergence protocol* (PDCP), *radio link control* (RLC) e controle de acesso ao meio (MAC). A seguir, descrevem-se as principais funções dessas camadas:

- A PDCP é responsável por fornecer aos *bearers* o ponto de acesso ao serviço, rece-



(a) Plano de usuário



(b) Plano de controle

Figura 2.2: Protocolos da E-UTRAN

bendo e entregando os pacotes IP dos usuários. As funções principais desta camada são a compressão de cabeçalho dos pacotes IP e a cifragem de informação. O cabeçalho desta camada contém um número de sequência que permite fazer ordenação dos pacotes IP.

- A RLC permite o envio confiável da unidade de dados de serviço (SDU) RLC (unidade de dados de protocolo (PDU) PDCP) entre o eNB e o UE. Esta camada fornece correção de erros mediante mecanismos *automatic repeat request* (ARQ), concatenação, segmentação e re-montagem. Fornece, também, detecção de duplicação e re-ordenação para compensar os efeitos da técnica *hybrid automatic repeat request* (HARQ), utilizada para retransmissões na camada física.
- A MAC é a responsável por controlar o acesso ao canal sem fio e pelo fornecimento de QoS, a qual é negociada com cada usuário no estabelecimento do *bearer*. Esta camada provê escalonamento dinâmico dos recursos de rádio.

No plano de usuário, as aplicações que estão sendo executadas pelos UEs geram tráfego de rede que é transportado por pacotes IP, que são enviados através da interface *LTE-Uu*,

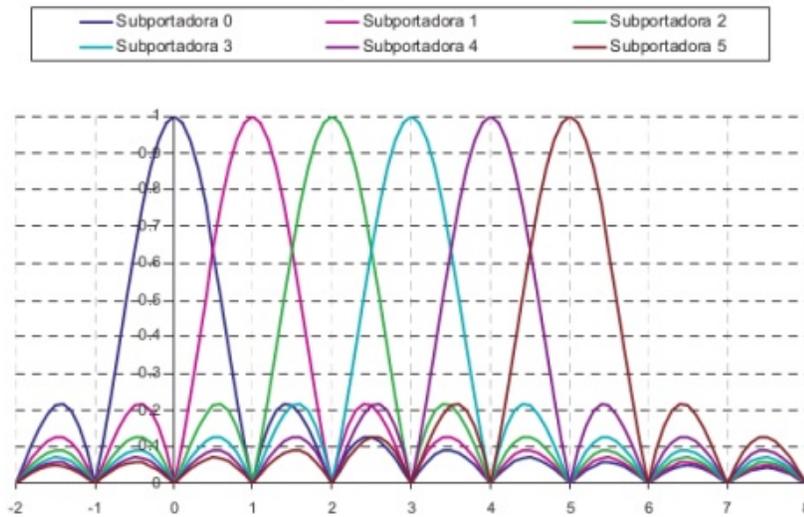


Figura 2.3: Espectro de frequência de seis subportadoras OFDM

utilizando as camadas descritas anteriormente (figura 2.2a). Quando os pacotes chegam ao eNB, são tunelados usando o protocolo *GPRS tunneling protocol* (GTP)-u para serem transportados pelo *backhaul* IP para o núcleo da rede móvel. GTP-U por sua vez utiliza o protocolo de transporte *user datagram protocol* (UDP).

No plano de controle, a camada *radio resource control* (RRC) permite o estabelecimento de uma conexão de controle entre o eNB e o UE através da qual se realiza a gerência da interface rádio, utilizando os protocolos de gerência de recurso rádio (RRM) (figura 2.2b). O plano de controle utiliza a mesma pilha de protocolos do plano de usuário nas camadas de enlace e física, porém na camada de rede utiliza protocolos NAS. Estes protocolos abrangem autenticação, autorização, gerência de mobilidade e gerência de *bearers*. As mensagens destes protocolos são transportadas de forma transparente na interface rádio, sendo encapsuladas dentro de mensagens RRC.

### 2.1.3 Acesso múltiplo

A multiplexação por divisão de frequência ortogonal (OFDM) é uma técnica de transmissão multi-portadora que multiplexa um conjunto de símbolos sobre um conjunto de subportadoras ortogonais (figura 2.3), permitindo transmitir os símbolos simultaneamente sem necessidade de separação entre cada sub-portadora, enquanto conserva a capacidade de detecção dos símbolos na recepção. As principais vantagens desta técnica são a alta eficiência espectral, robustez contra interferência e baixa distorção por propagação multi-percurso. Esta técnica é a base para os esquemas de acesso múltiplo utilizados pela LTE.

No enlace *downlink*, a técnica acesso múltiplo por divisão de frequência ortogonal

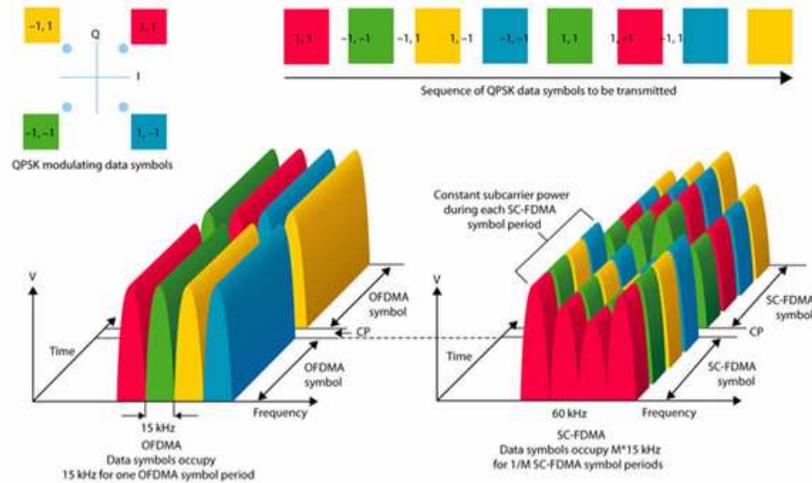


Figura 2.4: Comparação das técnicas de acesso múltiplo empregadas pela tecnologia LTE: OFDMA para *downlink* e SC-FDMA para *uplink*

(OFDMA) é utilizada para compartilhamento do canal sem fio. O OFDMA permite que os diferentes símbolos modulados OFDM, transmitidos sobre as sub-portadoras, pertençam a usuários diferentes. Desta forma, é possível ter transmissões simultâneas correspondentes a usuários distintos sobre diferentes subportadoras. No entanto, cada usuário precisa conhecer quais subportadoras contêm informações que estão sendo enviadas para ele. Esta sinalização é feita através de mensagens de controle que são enviadas para os usuários em canais comuns a todos os usuários (o *packet downlink control channel* (PDCCH)). As técnicas de modulações utilizadas na tecnologia LTE são *binary phase-shift keying* (BPSK), *quadrature phase shift keying* (QPSK) e *quadrature amplitude modulation* (QAM).

No entanto, a técnica de OFDMA tem uma *peak to average power ratio* (PAPR) bastante alta, o que gera um consumo alto de potência. Dado que este é um fator importante nas transmissões *uplink*, pois o UE é limitado pela capacidade da bateria, no enlace *uplink*, utiliza-se a técnica *single-carrier FDMA* (SC-FDMA). Esta técnica tem uma PAPR menor do que OFDMA, o que significa que tem uma melhor eficiência de potência. Diferente do OFDMA, no qual as transmissões dos símbolos são feitas paralelamente, no SC-FDMA, os símbolos são transmitidos sequencialmente (figura 2.4). Com isto, o SC-FDMA consegue uma PAPR menor do que o OFDMA [61]. Assim, o SC-FDMA retém a maior parte das vantagens do OFDMA, porém com um consumo menor de potência. No entanto, SC-FDMA coloca uma restrição importante na alocação dos recursos para transmissão em *uplink*, pois os blocos de recursos físicos (PRBs) alocados para um mesmo usuário devem ser consecutivos na frequência.

### 2.1.4 Camada física

As transmissões *uplink* e *downlink* na interface rádio da tecnologia LTE são organizadas dentro de quadros de 10 ms de duração. Cada quadro é subdividido em 10 sub-quadros de 1 ms, cada um dos quais é dividido adicionalmente em 2 *slots* de 0,5 ms (figura 2.5). Um *slot* compreende 7 símbolos OFDM no caso de usar o prefixo cíclico normal ou 6 símbolos OFDM no caso do prefixo cíclico estendido. No domínio da frequência, um *slot* contém 12 subportadoras de 15 kHz cada, ocupando assim 180 kHz. Uma unidade de 12 subportadoras por uma duração de um *slot* constitui um bloco de recurso (RB). A unidade mínima de recursos que pode ser alocada para um usuário transmitir é um PRB, que compreende 2 RBs. A alocação dos PRBs é controlada através de uma função de escalonamento que é executada a cada intervalo de tempo de transmissão (TTI) pelo eNB.

Existem dois tipos de estruturas de quadro diferentes, que dependem do modo de duplexação utilizada no sistema: *time-division duplexing* (TDD) ou *frequency-division duplexing* (FDD) (figura 2.6). No modo TDD, as transmissões tanto *uplink* com *downlink* acontecem na mesma faixa de frequências e o quadro rádio de 10 ms é dividido entre transmissões *downlink* e *uplink*. Essas transmissões são intercaladas no tempo para permitir a comunicação bidirecional entre o eNB e os UEs. A quantidade de sub-quadros que é alocada para cada sentido da comunicação pode ser configurada dinamicamente dependendo da carga da rede. No modo FDD, utilizam-se duas bandas separadas de frequência, uma para *uplink* e outra para *downlink*, possibilitando assim que o UE transmita em uma

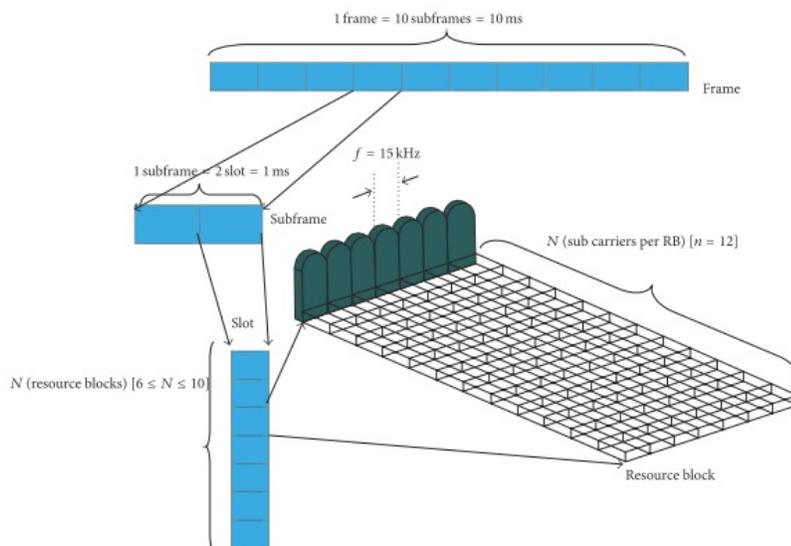


Figura 2.5: Grade de recursos em redes LTE

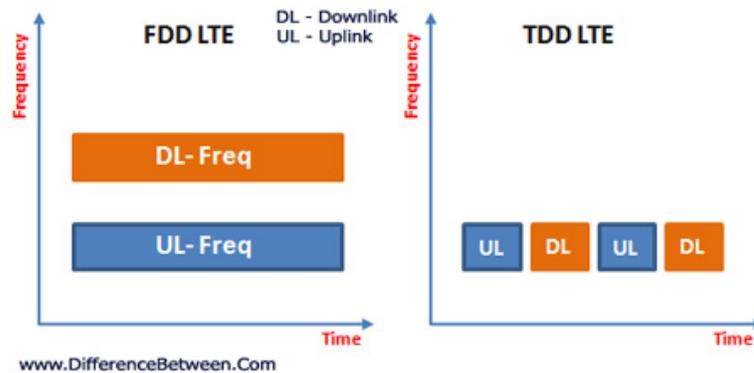


Figura 2.6: Modos de duplexação na tecnologia LTE

frequência (enlace *uplink*) e receba em outra (enlace *downlink*), simultaneamente. A maioria das implementações atuais da tecnologia LTE operam no modo FDD com diferentes largura de banda alocadas para *downlink* e *uplink*.

A largura de banda utilizada pelo sistema em qualquer modo de operação pode ser: 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz ou 20 MHz. Dependendo desta largura de banda, a quantidade de PRBs disponíveis no sistema para alocação aos usuários é 6, 15, 25, 50, 75 ou 100, respectivamente.

### 2.1.5 *Framework* de QoS

O nível de granularidade mais fino para o qual o controle de QoS é definido no EPS é chamado de *bearer*. Um *bearer* é um fluxo de pacotes estabelecido entre o P-GW e o UE. O tráfego de dados dos diferentes serviços e aplicações do cliente pode ser diferenciado em fluxos de dados de serviço (SDF). Os SDFs mapeados para o mesmo *bearer* recebem o mesmo tratamento de QoS na rede LTE. Esse mapeamento é feito através de filtros configurados durante o estabelecimento dos *bearers*. A filtragem dos pacotes é realizada utilizando uma quintupla, isto é, endereços IP e portas fonte e destino bem como o protocolo de comunicação usado. Em direção *uplink*, o UE faz o mapeamento dos SDFs para os *bearers*, enquanto a P-GW realiza o mapeamento no sentido *downlink*.

O identificador de classe de QoS (QCI), um valor escalar, especifica a classe à qual pertence o *bearer* e é atribuído a cada *bearer* LTE. Baseado no QCI, os mecanismos RRM executam um conjunto de tratamentos de encaminhamento para os pacotes pertencentes ao *bearer*. Baseados no QCI, os escalonadores podem definir a prioridade dos pacotes tanto em *uplink* como em *downlink*, os mecanismos de controle de acesso podem definir a prioridade na admissão de uma nova conexão, os diferentes elementos da rede definem os limiares para o gerenciamento das filas, e os protocolos da camada de enlace podem

realizar a configuração dos diferentes protocolos envolvidos na comunicação. Todos estes mecanismos são pré-configurados pelas operadoras em cada elemento da rede envolvido (*e.g.*, UE, eNB, P-GW, *switch*).

Um primeiro *bearer*, o *bearer* padrão, é criado quando o UE realiza o estabelecimento de conexão à rede. Este *bearer* sempre permanece associado com o UE enquanto ele está ligado à rede. O *bearer* padrão proporciona conectividade de melhor esforço para o UE. Os fluxos do usuário, também, podem ser associados com até sete *bearers* dedicados. Estes *bearers* dedicados permitem que a rede forneça diferentes níveis de QoS aos diferentes SDFs de um UE. O MNO controla quais SDFs são mapeados para *bearers* dedicados, e qual é o nível de QoS associado a cada *bearer* dedicado. Isto é feito por meio de políticas provisionadas pelo PCRF ou por políticas definidas diretamente nos elementos da rede. Os SDFs que não são mapeados para nenhum *bearer* dedicado usam o *bearer* padrão.

O 3GPP especificou vários valores padrões de QCIs e deu para cada um deles características que dependem dos serviços para os quais foram projetados [3]. Estes valores são pré-configurados nos elementos de rede a fim de manter interoperabilidade entre diferentes MNOs. Os valores padrões de QCI e características associadas a cada um deles são resumidas na tabela 2.1.

Em LTE, existem dois tipos de *bearer*: GBR e não-GBR (nGBR). Os *bearers* GBR podem definir uma taxa de bit garantida associada com eles, enquanto os nGBR não

Tabela 2.1: QCIs padronizados pelo 3GPP [3]

QCI	Tipo de Recurso	Prioridade	PDB	PELR	Exemplos de Serviços
1	GBR	2	100	$10^{-2}$	Conversação de voz
2	GBR	4	150	$10^{-3}$	Videoconferência
3	GBR	3	50	$10^{-3}$	Jogos em tempo real
4	GBR	5	300	$10^{-6}$	<i>Buffered streaming</i>
5	nGBR	1	100	$10^{-6}$	Sinalização de IMS
6	nGBR	6	300	$10^{-6}$	Vídeo, TCP-based ( <i>e.g.</i> , WWW, e-mail, chat, FTP, P2P, vídeo progressivo, etc.)
7	nGBR	7	100	$10^{-3}$	Voz, vídeo ( <i>live streaming</i> ) e jogos interativos
8	nGBR	8	300	$10^{-6}$	Vídeo
9	nGBR	9	300	$10^{-6}$	Aplicações baseadas em TCP

possuem nenhuma garantia de taxa. O valor atribuído ao QCI determina como o *bearer* deve ser servido ao longo da rede. Um *bearer* possui também os seguintes parâmetros que estão diretamente relacionados com o tipo de *bearer*: prioridade, orçamento de atraso do pacote (PDB) e taxa de perda de pacotes de erro (PELR). O PDB fornece um limite de atraso com nível de confiança de 98%, ou seja, atua como uma limitante superior “brando”. A PELR define um limite superior para a taxa de perda de pacotes não relacionada com congestionamento. O nível de prioridade indica a prioridade do *bearer*. Outros atributos importantes de QoS associados a um *bearer* LTE são:

- taxa de bit garantida (GBR) — é o valor de taxa mínima de bit garantida pela rede; válido somente para *bearer* GBR.
- taxa máxima de bit (MBR) — é o valor da taxa máxima de bit suportada pela rede. O *bearer* não pode exceder esse limite. Nos *releases* 8 e 9 o valor do MBR é igual ao valor GBR. Nas versões mais recentes o valor do MBR pode ser maior do que o valor do GBR; válido apenas para GBR.
- prioridade de alocação e retenção (ARP) — que é usado pelo controle de admissão e pelo controle de sobrecarga para o tratamento no plano de controle do *bearer*. O controle de admissão usa o parâmetro ARP para decidir se o estabelecimento de um *bearer* ou o pedido de modificação deve ser aceito ou rejeitado, enquanto o controle de sobrecarga o usa para decidir qual *bearer* deve ser liberado durante situações de sobrecarga.
- MBR agregado (AMBR) — que é o valor de taxa total de bit para um grupo de *bearers* nGBR suportada pela rede. O AMBR pode ajudar a operadora na diferenciação entre seus assinantes, atribuindo maiores valores da AMBR ao seus clientes de maior prioridade; válido apenas para *bearers* nGBR.

### 2.1.6 Gerência de recursos de rádio (RRM)

A gerência de recurso rádio (RRM) envolve uma grande variedade de técnicas e procedimentos que incluem controle de potência, escalonamento de pacotes, gerência de consumo de energia, gerência de QoS, controle de admissão, *handoff*, estabelecimento de conexão, adaptação do enlace e do PDCCH, e gerência da informação sobre a qualidade do canal. Técnicas avançadas tais como *self organized networks* (SON) e gerência de interferência, fazem uso das funções RRM.

O LTE foi desenvolvido com o objetivo de suportar requisitos de QoS das várias aplicações multimídia disponíveis na Internet. Nessa direção, o eNB executa duas tarefas principais: controle de admissão rádio (RAC), que decide sobre a admissão de novas

conexões, e o escalonamento de pacotes (PS), que distribui os recursos de rádio entre os usuários. O padrão LTE não define políticas de controle de admissão nem algoritmos de escalonamento específicos, deixando-os para que os vendedores de equipamento os implementem. Como consequência, o RAC e o PS em LTE têm atraído a atenção de pesquisadores tanto da academia como da indústria.

Existem duas abordagens para a implementação de escalonadores LTE. A primeira é ter apenas um algoritmo que faça a seleção dos usuários e a alocação dos recursos para cada um deles. Nesta abordagem, somente o escalonador no domínio da frequência é utilizado. Esta abordagem possui alguns problemas e limitações. Primeiro, o controle sobre retransmissões e a justiça entre usuários são limitadas [54]. Esta abordagem possui desempenho limitado, principalmente quando a largura de banda do sistema é grande e o número de usuários requisitando transmissões em um TTI é alto, pois a complexidade dos algoritmos no domínio da frequência dependem destes dois valores. Dado que o algoritmo de escalonamento em sistemas FDD tem que tomar decisões de alocação de recursos a cada 1 ms, sua complexidade deve ser a menor possível. A complexidade deste algoritmo afeta diretamente o custo do eNB dado que algoritmos com complexidade maior requerem eNBs com mais recursos de hardware.

Para lidar com esses problemas, uma segunda abordagem conhecida como escalonamento em dois estágios foi proposta [54]. Nesta abordagem, o escalonador de pacotes LTE compreende dois algoritmos de escalonamento diferentes, um no domínio do tempo e outro no domínio da frequência (figura 2.7). O escalonador no domínio do tempo seleciona um subgrupo de requisições de UE para serem escalonadas no domínio da frequência, no próximo TTI. Essa escolha pode levar em consideração: (i) a condição do canal (*channel-aware*), (ii) a situação de interferência nas células vizinhas (*interference-aware*), (iii) os atributos de QoS associados com o QCI de cada um dos *bearers* (*QoS-aware*) ou (iv) o histórico da alocação de recursos de cada usuário (*fairness-aware*). Um escalonador pode usar um ou mais desses critérios para tomar decisões de escalonamento. O subgrupo de requisições selecionadas é passado para o escalonador no domínio da frequência, que determina os PRBs a serem atribuídos aos usuários. No domínio da frequência, a escolha dos recursos deve ser feita principalmente baseada na qualidade do canal que cada usuário está experimentando em cada um dos PRBs. Além de conseguir prover requisitos de QoS, o escalonador no domínio do tempo reduz a complexidade do escalonador no domínio da frequência, passando para este apenas um número reduzido de pedidos de usuários e não a quantidade total de requisições.

Na abordagem de escalonamento somente no domínio da frequência, o escalonador calcula uma métrica de escalonamento para cada um dos  $N$  usuários com requisições nesse TTI para cada um dos  $R$  PRBs disponíveis no sistema. Assim sendo, a complexidade mínima de um algoritmo de escalonamento nesta abordagem é  $N \times R$ . Com a abordagem

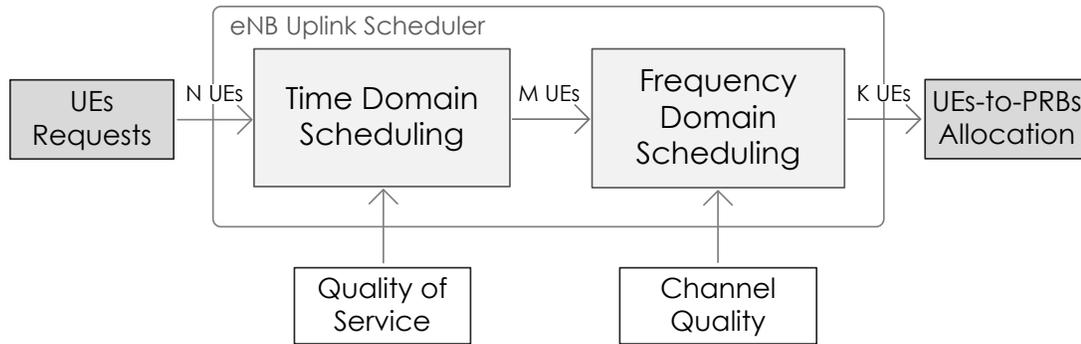


Figura 2.7: Escalonamento LTE em dois estágios

de escalonamento em dois estágios, o escalonador no domínio do tempo calcula uma métrica para cada um dos  $N$  usuários, e no domínio da frequência o escalonador deve calcular somente a métrica para  $M$  usuários escolhidos pelo escalonador no domínio do tempo, em cada um dos  $R$  PRBs. A complexidade mínima desta abordagem é  $N + M \times R$ . No entanto, em um sistema real LTE,  $M$  é muito menor do que  $N$ . Para um sistema com 20 MHz de largura de banda  $R$  é igual a 100,  $M$  é igual a 20 e  $N$  pode potencialmente atingir valores próximos de 30.000 em cenários MTC baseados em LTE [19].

O escalonamento em *uplink* e *downlink* têm muitas semelhanças, mas também diferenças substanciais. Em *downlink* o eNB tem acesso direto às filas de cada um dos *bearers*, conseguindo assim ter informações exatas sobre o tamanho dos *buffers* de cada um dos *bearers* dos usuários e do atraso dos pacotes nas filas. Além disso, a técnica OFDMA, utilizada nas transmissões *downlink*, permite que os usuários possam ser escalonados em qualquer ordem e em qualquer um dos PRB disponíveis. Outra característica do *downlink* é que o eNB não tem acesso direto às informações sobre as condições do canal *downlink*.

Para que os escalonadores possam conhecer o estado do canal de cada um dos usuários, medições das condições do canal *downlink* são feitas e enviadas pelo UE através de uma mensagem chamada *channel quality information* (CQI). Esta mensagem é enviada para o eNB periodicamente sobre o canal *packet uplink control channel* (PUCCH).

Entretanto, em *uplink*, o eNB não conhece o tamanho dos *buffers uplink* dos UEs, nem tem acesso ao atraso dos pacotes nesses *buffers*. Além disso, o eNB deve alocar as transmissões *uplink* de um mesmo usuário em PRBs contínuos na frequência devido às restrições impostas pela técnica de acesso múltiplo SC-FDMA utilizada nas transmissões *uplink*. Isto aumenta ainda mais a complexidade do escalonador no domínio da frequência.

Para informar o tamanho do *buffer* ao eNB, o UE envia a mensagem chamada relatório do estado do buffer (BSR). Esta mensagem é empregada para solicitar recursos do eNB para transmissões *uplink*. O BSR contém a quantidade de bytes em cada um dos *buffers* dos *bearers*.

Para fornecer escalonamento ciente dos requisitos de QoS, o eNB precisa conhecer o atraso do pacote mais antigo no *buffer* de cada um dos *bearers* do usuário. Devido ao *overhead* e eficiência, o 3GPP decidiu que o eNB apenas pode enviar informações do tamanho dos *buffers* utilizando BSRs e não pode anexar informações relacionadas ao atraso dos pacotes [54]. Sendo assim, algoritmos para estimar o atraso baseados nas mensagens BSRs são necessários para fornecer provisão de QoS em *uplink* [44].

## 2.2 *Ethernet passive optical network (EPON)*

Uma PON é uma rede óptica que não possui elementos ativos na rede de distribuição óptica (ODN), ou seja, no caminho entre a fonte e o destino não existe nenhum elemento alimentado com energia. Os únicos elementos usados na rede de distribuição de uma PON são componentes ópticos passivos, tais como fibras ópticas, emendas e divisores ópticos (*splitters*). A fibra óptica é compartilhada com o uso de *splitters* que dividem o sinal óptico em diferentes sinais, que são transportados através de fibras para o local de terminação óptica. Dependendo da topologia utilizada na ODN (Subseção 2.2.1), o *splitters* podem ser 1:N, 2:2, ou cascata de 1:2. Os únicos elementos ativos nas PONs são o terminal de linha óptica (OLT) e as ONUs. Estes elementos ficam nos extremos da rede. O OLT normalmente reside nas instalações do provedor de serviço, conhecido como escritório central (CO), enquanto a localização das ONUs varia dependendo do tipo de aplicação ou arquitetura para a qual o serviço do usuário está associado, como será descrito na Subseção 2.2.2.

As PONs proporcionam uma estratégia de evolução tecnológica, pois podem ser utilizadas para aproveitar a base instalada de cabos de cobre e cabos coaxiais nas redes de acesso. Além disto, a evolução dos serviços em PONs é simples. As principais vantagens da sua arquitetura são: (i) a redução dos custos de implantação e de manutenção e (ii) o aumento da largura de banda disponível utilizando a mesma ODN sem a necessidade de aumento no número de componentes ativos na rede. Por esses motivos, as PONs estão se firmando como a solução de fato para prover acesso em banda larga nas redes de acesso.

Estas características das PONs motivaram as várias entidades de padronização a estudar a aplicação das PONs nas redes de acesso para provisionar serviços em banda larga que requerem altas taxas de transmissão. Como resultado desses estudos, os padrões IEEE 802.3ah e GPON, baseados em multiplexação por divisão de tempo (TDM), foram propostos pelo instituto de engenheiros elétricos e eletrônicos (IEEE) e a ITU, respectivamente.

O padrão IEEE 802.3ah, publicado em 2004, especificou a camada física e MAC da tecnologia conhecida como 1G-EPON ou simplesmente EPON. EPON permite comunicação ponto-multiponto a 1 Gb/s entre o OLT e as ONUs tanto em *upstream* como em

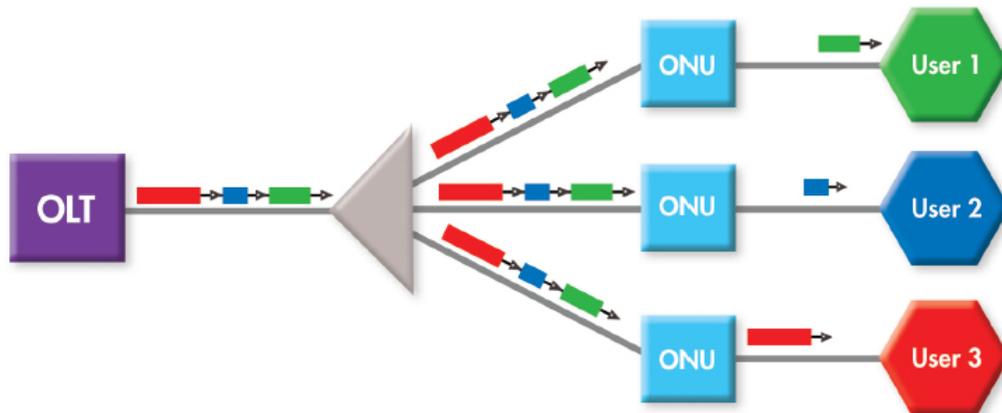


Figura 2.8: Rede EPON utilizando TDM em direção *downstream*

*downstream*, com um alcance até de 20 km (*short-range PON*).

Na direção *downstream*, do OLT para as ONUs, a EPON envia pacotes para diferentes ONUs compartilhando a fibra através de TDM (figura 2.8). Esta técnica de multiplexação permite que a fibra *feeder* (do OLT até o *splitter*) seja compartilhada com transmissões para todas as ONUs. Assim, todos os pacotes enviados pelo OLT chegam a cada uma das ONUs na PON. Quando um pacote chega na ONU, esta verifica se o pacote é destinado para ela, senão o pacote é simplesmente ignorado, não sendo processados pela ONU.

Na direção *upstream*, das ONUs para o OLT, a EPON permite o acesso ao meio de múltiplos usuários utilizando a técnica acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA) (figura 2.9). Neste esquema, cada ONU transmite para o OLT em um tempo determinado e o sinal transmitido por uma ONU só atinge o OLT, mas não outras ONUs. Para evitar colisões de dados e aumentar a eficiência da rede de acesso, em EPON as transmissões das ONUs são arbitradas pelo OLT através de um algoritmo de alocação dinâmica de largura de banda (DBA) que utiliza o protocolo de controle multi-ponto (MPCP) para sinalização. Esta arbitragem é conseguida através da atribuição de janelas de transmissão dedicadas para cada uma das ONUs. Uma ONU pode transmitir somente quando tiver uma concessão enviada pelo OLT através do protocolo MPCP. Quando chega a concessão, a ONU transmite quadros (*frames*) na velocidade da linha de transmissão óptica durante a janela de transmissão atribuída.

### 2.2.1 Topologias da rede de distribuição óptica (ODN)

A ODN de uma EPON (e em forma geral, de qualquer PON) pode adotar diferentes topologias dependendo principalmente das necessidades e requerimentos do provedor de rede.

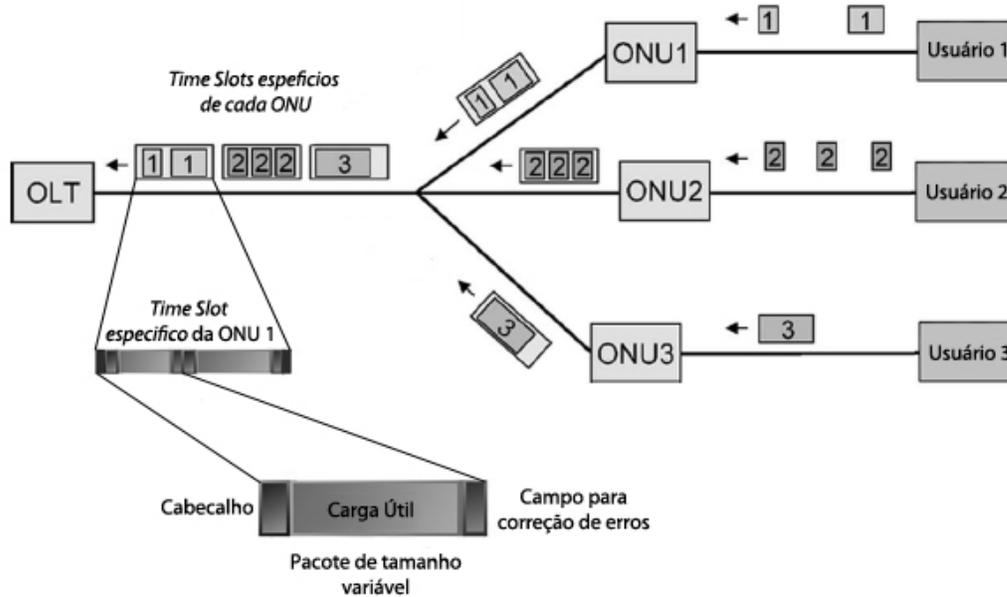


Figura 2.9: Rede EPON utilizando TDMA em direção *upstream*

As topologias mais frequentemente encontradas em implementações atualmente são: (i) árvore (figura 2.10a), conhecida como *trunk-and-branch*, que é a topologia mais utilizada nas implementações atuais em áreas densas devido a seu baixo custo de implementação e a sua alta escalabilidade [20]; (ii) barramento (figura 2.10b), que tem um baixo custo e menor escalabilidade devido às perdas de potência causada pelos *splitters* e utilizada mais frequentemente em áreas pouco densas; (iii) anel (figura 2.10c), que também é usada entre as operadoras, principalmente por seu suporte a sobrevivência frente a cortes nas fibras da ODN.

### 2.2.2 Arquiteturas das redes ópticas passivas (PONs)

As arquiteturas (ou aplicações) das PONs são definidas pela conexão do terminal óptico de recepção (ONU). Segue alguns dos modelos mais comuns na atualidade em arquiteturas de rede de transmissão óptica:

- *fiber to the building* (FTTB) é uma arquitetura na qual a rede *drop* (rede que entrega conectividade óptica) finaliza na entrada de um prédio (comercial ou residencial). A partir deste ponto terminal, o acesso interno aos clientes é realizado geralmente através de uma rede com cabeamento estruturado. A fibra óptica chega até o ponto de entrada existente no prédio.

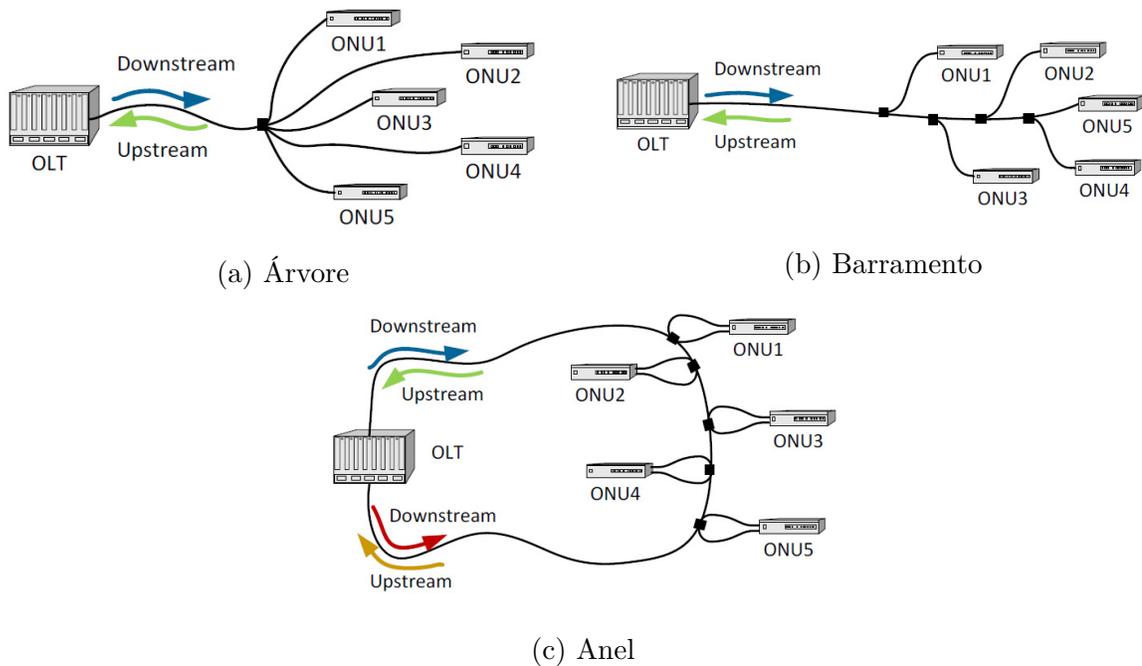


Figura 2.10: Topologias da ODN nas PONs

- *fiber to the home* (FTTH) é uma arquitetura na qual a rede *drop* termina na residência do cliente que é servido por uma fibra óptica exclusiva para este acesso. Entre a rede *drop* e a rede interna do assinante geralmente é utilizado um elemento óptico para realizar a transição do sinal óptico para o interior da residência. Após esta transição, o sinal é disponibilizado através de uma extensão ou cordão óptico para o receptor óptico do cliente.
- *fiber to the apartment* (FTTA) é uma arquitetura na qual a rede *drop* termina no prédio (comercial ou residencial) chegando a uma sala de equipamentos. A partir desta sala, o sinal óptico pode sofrer uma divisão através do uso de *splitters*, sendo posteriormente encaminhado individualmente a cada apartamento ou escritório. É semelhante ao FTTH.
- *fiber to the curb* (FTTC) é uma arquitetura constituída por unidades remotas que atendem poucos assinantes a uma distância de algumas dezenas de metros. Trata-se de levar a fibra até os "armários" situados a um máximo de 300m dos prédios, a partir dos quais se utiliza par de cobre para transportar o sinal de dados até os clientes.
- *fiber to the node* (FTTN) é uma arquitetura utilizada nas redes de distribuição das operadoras de serviços de telecomunicações (*e.g.*, MSOs), na qual a fibra óptica que

sai do escritório central é conectada diretamente a um armário de rua, situado a mais de 300 m do cliente, e depois o sinal é transformado de óptico para elétrico para ser feita distribuição em cabeamento metálico até o ponto de atendimento do cliente.

- *fiber to the desk* (FTTD) é uma arquitetura utilizada principalmente nas redes corporativas, nas quais a demanda por banda de transmissão em aplicações de videoconferência e mesmo de Internet exige uma capacidade adicional das redes locais para a transmissão de voz, dados e imagem.
- FTTCcell é uma arquitetura utilizada para a prestação do serviço de *backhaul* das estações rádio base das MNOs. Nesta arquitetura, a fibra é levada até os lugares onde as estações rádio base encontram-se localizadas.

### 2.2.3 *Multi-point control protocol* (MPCP)

Em redes Ethernet tradicionais, a técnica de acesso múltiplo ao canal compartilhado é baseado no protocolo *carrier-sense multiple access with collision detection* (CSMA/CD), porém em redes EPON a detecção de colisões torna-se pouco eficiente, devido as características próprias tais como tempo de ida e volta (RTT) e o desperdício de largura de banda ocasionado por colisões. Conseqüentemente, nas EPON no sentido *upstream*, cada ONU transmite em turnos para o OLT, empregando TDMA. Esses tempos de transmissão são controlados pelo OLT através de um algoritmo conhecido como DBA.

A EPON define o protocolo MPCP para suportar o escalonamento dinâmico e sinalizar a alocação dos recursos no sentido *upstream* [1],[2]. Este protocolo introduz cinco novas mensagens na camada MAC das EPONs (baseada em *frames*). As mensagens *register request*, *register* e *register ack* são utilizadas no processo de auto descoberta para registrar uma nova ONU no OLT. As mensagens *gate* e *report* são usadas para requisição e alocação de banda passante no sentido *upstream*. A mensagem *gate* é enviada *downstream* pelo OLT, informando uma ONU particular sobre seu *timeslot* de transmissão (*i.e.*, o tempo de começo da transmissão e por quanto tempo pode transmitir na linha óptica). A mensagem *report* é enviada por uma ONU para o OLT via *upstream*, contendo a solicitação de transmissão, mais especificamente, esta mensagem informa o eNB o número de bytes que se encontram nas filas *upstream* da ONU. No entanto, o MPCP não especifica nenhum algoritmo de alocação de banda particular para negociar a largura de banda no sentido *upstream*.

### 2.2.4 Dynamic bandwidth allocation (DBA)

O algoritmo DBA, conhecido também como escalonador inter-ONU, ajuda a aumentar a utilização dos recursos disponíveis e pode, também, garantir QoS nas EPONs. Este tipo de algoritmo reside na OLT e é o responsável pela alocação das oportunidades de transmissão (*grants*) para cada ONU na EPON. No entanto, o padrão IEEE 802.3ah não especifica nenhum algoritmo DBA, motivando assim inúmeros trabalhos nesta área.

Nesta dissertação, utiliza-se o algoritmo IPACT com a política de serviço *limited* [42], [41]. O IPACT é um dos algoritmos DBA mais conhecidos e citados na literatura, sendo o esquema no qual se baseiam grande parte dos mecanismos DBA existentes para EPONs [20]. O IPACT concede oportunidade de transmissão para cada uma das ONUs ligadas ao OLT utilizando um mecanismo *round robin*. O intervalo de tempo alocado para cada ONU a cada rodada de escalonamento depende da política de serviço IPACT definida pela operadora. O IPACT define quatro políticas de serviço chamadas: *fixed*, *gated*, *limited* e *excess*. A política que mostrou melhores resultados foi a política *limited* [42].

A cada rodada de escalonamento, as ONUs enviam uma mensagem *report*, a fim de informar o eNB sobre o estado dos seus *buffers*. Seja  $Report_i(n-1)$  a mensagem *report* enviada pela  $i$ -ésima ONU no ciclo  $n-1$ , a quantidade de bytes (*grant*) que o protocolo IPACT com a política *limited* aloca para a  $i$ -ésima ONU no próximo ciclo de transmissão  $n$ , denotado por  $Gate_i(n)$  é dado pela [41]:

$$Grant_i(n) = \min(Report_i(n-1), W_{max}) \quad (2.1)$$

onde,  $W_{max}$  é a quantidade máxima de bytes que podem ser escalonados a cada ciclo de escalonamento EPON. Em uma rede EPON na qual todas as ONUs têm requisitos mínimos de banda iguais,  $W_{max}$  é calculado como:

$$W_{max} = R_u \left( \frac{T_{max}}{N} - B \right) \quad (2.2)$$

onde,  $R_u$  é a velocidade de transmissão da linha óptica (*e.g.*, 1 Gb/s),  $T_{max}$  é a duração máxima do ciclo (*e.g.*, 2 ms, 5 ms),  $N$  é o número de ONUs na EPON (*e.g.*, 8, 16, 32) e  $B$  é o período de guarda.

## 2.3 Redes fiber-wireless (FiWi)

A comunidade científica e a indústria têm trabalhado na integração de redes ópticas e sem fio, conceito conhecido como redes FIWI [29]. Dado que as tecnologias consideradas neste trabalho são a tecnologia de acesso móvel em banda larga LTE e a tecnologia de acesso óptico em banda larga EPON, dois grupos de possíveis soluções para a convergência das duas redes são rádio e fibra (R&F) e rádio sobre fibra (RoF).

A tecnologia de RoF surgiu com a intenção de prover uma infraestrutura barata e expansível para que as redes sem fio pudessem aumentar a sua cobertura e também oferecer maiores taxas de dados para os usuários, tudo isso com um baixo custo. Baseia-se no emprego de enlaces ópticos para a distribuição de sinais de *rádio frequência* (RF) entre uma estação base de controle (BSC) e diversas unidades de antena remota (RAUs). Os sinais de RF, que nas redes sem fio convencionais são modulados e tratados em cada uma das estações rádio base, sofrem conversão eletro-óptica nas RAUs e são transportados até a BSC, onde finalmente são (de)codificadas, (de)moduladas bem como todos outros tratamentos necessários para o funcionamento da rede [29]. Esse processamento centralizado possibilita o barateamento do custo de instalação e manutenção das antenas, já que o seu hardware é mais simples e todo o processamento e controle da rede (*software*) passa a ser centralizado na BSC.

Na convergência do tipo R&F existem duas abordagens na literatura [29]. A primeira chamada arquitetura *independente* e a segunda chamada arquitetura *híbrida* ou *integrada*. Na primeira, a estação rádio base é interligada à ONU somente como um cliente da EPON. A ONU e a estação base estão ligadas através de uma interface padrão (*e.g.*, Ethernet) e operam independentemente uma da outra, portanto, a estação rádio base é tratada como um usuário final genérico ligado à ONU. A operação, controle e gerência são independentes também. A alocação de banda *upstream/downstream*, o escalonamento de pacotes e a gerência de filas das ONUs e do OLT servem os clientes fixos e são independentes daqueles usados na RAN. Na arquitetura híbrida (figura 2.11), a estação rádio base e a ONU encontram-se integrada em um sistema único, denominado ONU-BS. A integração pode ser apenas lógica (*software*) ou física (*hardware* e *software*). Em qualquer caso, o processo de alocação de banda, escalonamento de pacotes, e gerência de filas tanto da RAN como da EPON podem ser integrados. Assim sendo, esta arquitetura tem o melhor desempenho em termos de relação custo-benefício, utilização de largura de banda e provisão de QoS. Isto porque esta arquitetura permite ter acesso ao estado tanto da rede sem fio quanto da rede óptica e compartilha essas informações entre as duas redes para tomar a melhor decisão no momento de alocar os recursos, utilizando um controle centralizado. Outro benefício importante dessa arquitetura é que o custo dos equipamentos é menor do que o da arquitetura independente, quando a integração é feita fisicamente.

## 2.4 Resumo conclusivo

Este capítulo apresentou os conceitos básicos necessários para o entendimento dos assuntos tratados nesta dissertação. Apresentou, inicialmente, as principais características das tecnologias LTE e EPON, focando na arquitetura, protocolos e esquema de alocação de recursos e provisão de QoS. Discutiu as arquiteturas para a convergência de redes ópticas

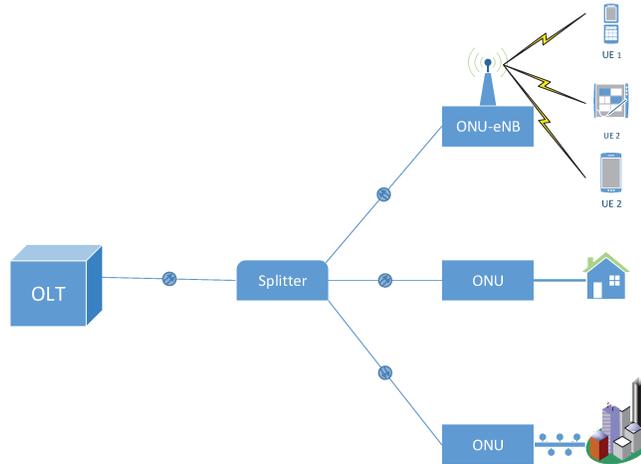


Figura 2.11: Arquitetura integrada LTE-EPON

e sem fio, que são conhecidas como redes FIWI.

Os conceitos sobre a camada física, gerência de recursos de rádio e *framework* de QoS servem de base para a definição do escalonador com provisão de QoS em redes LTE proposto no Capítulo 3. Especificamente, as questões relacionadas com escalonamento *uplink*, alocação de recursos e provisão de QoS em redes LTE são relevantes para esse capítulo.

O *framework* de QoS em redes integradas LTE-EPON, introduzido no Capítulo 4, faz uso de todos os conceitos apresentados neste capítulo. O *framework* foi definido para a arquitetura híbrida de redes FIWI, para a qual os conceitos relacionados com redes EPON tais como arquitetura, topologia, protocolos e algoritmos DBA são relevantes. O *framework* utiliza, também, os conceitos relacionados com escalonamento LTE anteriormente mencionados, pois emprega o escalonador definido no Capítulo 3 como base para a definição de uma novo escalonador para redes integradas LTE-EPON na arquitetura híbrida.



## Capítulo 3

# Provisão de QoS em Redes Móveis LTE no Sentido *Uplink*

A especificação da tecnologia LTE proposta pelo 3GPP não define políticas nem algoritmos específicos para funções RRM, deixando aberto para os fabricantes de equipamento implementarem as suas próprias soluções. Como consequência, mecanismos RRM, incluindo o escalonamento de pacotes, têm atraído a atenção de pesquisadores tanto na academia como na indústria, pois esses mecanismos podem dar uma grande diferenciação no produto final, que neste caso é o eNB.

Embora o foco desta dissertação seja o problema de provisionamento de QoS em redes integradas LTE-EPON, o escalonador de pacotes LTE é fundamental para o fornecimento de garantias de QoS aos usuários móveis e para a melhor utilização dos escassos recursos de rádio. Geralmente, os escalonadores LTE no sentido *uplink* com suporte a requisitos de QoS priorizam os *bearers* GBR sobre os *bearers* nGBR de forma estática, por exemplo, através de adoção de filas de prioridades diferentes para cada um dos tipos de requisições.

Este capítulo propõe um escalonador para redes LTE no sentido *uplink* que provê requisitos de QoS e melhora a vazão total da rede. Para isto, uma política de escalonamento no domínio do tempo específica para provisão de QoS foi definida. Essa política modifica dinamicamente a prioridade dos usuários móveis para favorecer aqueles com requisitos de QoS rigorosos em detrimento do desempenho dos outros usuários quando se tem requisitos de QoS próximo a serem violados. Quando existirem fluxos *realtime*<sup>1</sup> cujo escalonamento possa ser adiado (*i.e.*, esperar um pouco para serem servidos, mas ainda respeitando seus requisitos de QoS), alguns fluxos *non-realtime*<sup>2</sup> poderão ser escalonados a fim de incrementar a vazão do sistema. Esta abordagem consegue incrementar a vazão da rede, pois, geralmente, usuários com fluxos *non-realtime* têm número elevado de by-

---

<sup>1</sup>fluxos *realtime* são aqueles que requerem garantias de QoS, tais como atraso e taxa de bit.

<sup>2</sup>fluxos *non-realtime* são aqueles que não possuem requisitos rigorosos de QoS.

tes para serem transmitidos nos *buffers uplink*, enquanto usuários com aplicações de voz, por exemplo, geram pacotes periodicamente, porém têm poucos bytes nos *buffers uplink*. Além disso, devido às restrições no PDCCH, se vários usuários *realtime* forem escalonados em um mesmo TTI, é bastante provável que os recursos rádio, ou seja, os PRBs, não sejam suficientemente bem utilizados.

Este capítulo está organizado da seguinte forma. A Seção 3.1 revisa os principais trabalhos relacionados com escalonamento em dois estágios com suporte a requisitos de QoS. A Seção 3.2 apresenta um novo escalonador LTE *uplink* no domínio do tempo. Seguindo a abordagem de escalonamento em dois estágios descrita na Seção 2.1.6, este escalonador é o responsável pelo fornecimento de QoS aos usuários móveis. O escalonador no domínio da frequência empregado neste trabalho é descrito na Seção 3.3. A avaliação de desempenho do escalonador proposto é apresentada na Seção 3.4. Finalmente, a Seção 3.5 traz as considerações finais do capítulo.

## 3.1 Trabalhos relacionados

Embora vários escalonadores LTE *uplink* para o domínio da frequência tenham sido propostos e estudados ([59],[15],[45],[64],[50],[56]), existem poucos trabalhos na literatura que considerem escalonamento no domínio do tempo e no domínio da frequência de forma conjunta ([8], [23], [48]). Como explicado na Subseção 2.1.6, esse tipo de abordagem é conhecido como escalonamento em dois estágios.

Delgado e Jaumard [23] propõem dois escalonadores LTE para o sentido *uplink*, chamados de *single channel scheduling algorithm* (SC-SA) e *multiple channel scheduling algorithm* (MC-SA). Estes algoritmos utilizam a mesma métrica de escalonamento para selecionar as requisições a serem escalonadas (i.e., usuários) tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. Estes dois algoritmos assumem que garantias de taxa mínima devem ser dadas a todos os tipos de tráfego, o que é contrário à especificação LTE, pois *bearers* nGBR não deveriam ter nenhuma garantia de taxa associada a eles. Outro problema com estas duas propostas é que não levam em consideração as limitações no canal de controle, dado que podem atender tantos UEs quantos PRBs estejam disponíveis. Segundo [16], o número máximo de usuários que pode ser escalonados por TTI em cada direção é limitado. Por exemplo, para um sistema LTE com 10 MHz de largura de banda, em média, somente 10 usuários podem ser escalonados por TTI em cada direção (*uplink* e *downlink*), caso as limitações no canal de controle forem consideradas. Esse número depende principalmente da condição do canal que cada usuário a ser escalonado estiver percebendo no momento do escalonamento, na direção *downlink*.

Anas *et al.* [8] introduziram um dos primeiros escalonadores com dois estágios desenvolvidos para redes LTE no sentido *uplink* com provisão de requisitos de QoS. Este

escalonador leva em consideração o parâmetro de taxa mínima para tráfego do tipo GBR, porém, semelhantemente ao trabalho anterior, ele usa o parâmetro GBR para escalonar *bearers* não nGBR. Além disto, ele não leva em consideração qualquer parâmetro relacionado com o atraso. Este trabalho é um pouco mais conservador com as restrições impostas pelo PDCCH, assumindo um número máximo de 8 usuários escalonados por TTI para uma largura de banda de 10 MHz.

Mais recentemente, Marwat *et al.* [47],[48] apresentaram um escalonador LTE *uplink* chamado *bandwidth and QoS aware* (BQA), que suporta tanto taxa garantida como limiar máximo de atraso e considera que no máximo 5 UEs podem ser escalonados por TTI utilizando 5 MHz de largura de banda, o que está de acordo com [16]. No entanto, o escalonador BQA também usa o parâmetro GBR para priorizar *bearers* nGBR, e portanto, não é compatível com o padrão LTE.

Em resumo, os escalonadores revisados não são compatíveis com o padrão. Além disto, nenhum dos trabalhos mencionados avalia como os critérios de projeto do escalonador no domínio do tempo e do escalonador no domínio da frequência influenciam o fornecimento de QoS. Adicionalmente, a taxa de perda de pacotes e vazão por usuário, que são duas métricas importantes para a análise de desempenho de um escalonador com suporte a requisitos de QoS, foram ignoradas na avaliação dos escalonadores mencionados anteriormente. Finalmente, os escalonadores apresentados têm o objetivo de fornecer QoS, porém não se preocupam com o desempenho geral da rede em termos de vazão total alcançada.

## 3.2 Proposta de escalonador LTE *uplink* no domínio do tempo

Esta seção apresenta um novo escalonador *uplink* no domínio do tempo, chamado *z-based QoS scheduler* (ZBQoS), compatível com o padrão LTE. O escalonador ZBQoS segue a especificação de QoS de LTE e emprega uma função de prioridade, também conhecida com métrica de escalonamento, relacionada com QoS para priorizar os usuários no escalonamento. Este escalonador leva em consideração as limitações impostas ao escalonamento pelo PDCCH.

### 3.2.1 Algoritmo de escalonamento

O funcionamento do escalonador ZBQoS será descrito a seguir. O escalonador seleciona um subconjunto de pedidos de UEs a serem escalonados, no TTI seguinte, pelo algoritmo de escalonamento no domínio da frequência. Esta seleção é baseada em uma função de prioridade projetada para prover requisitos de QoS, enquanto melhora a vazão agregada do sistema. O valor da função de prioridade utilizada para a seleção é o valor mínimo

entre uma métrica relacionada com o atraso e uma métrica relacionada com a taxa para *bearers* GBR. Para *bearers* nGBR, utiliza-se apenas uma métrica específica para o tipo de tráfego servido por esta classe e que está relacionada somente com o atraso, pois o padrão LTE não garante taxa mínima para este tipo de *bearers*.

O Algoritmo 1 mostra uma visão geral desses passos. Primeiramente, o escalonador calcula o valor da métrica para cada UE com transmissões pendentes, a fim de definir a prioridade das requisições dos UEs (linhas 3-12). Em seguida, as requisições de banda passante dos UEs são classificadas em uma ordem de prioridade decrescente (linha 13). Depois disso, o algoritmo limita o número de UEs enviados para o escalonador no domínio da frequência (linhas 14-18). Isto diminui a complexidade do escalonador no domínio da frequência. O número máximo de UEs enviados para o escalonador no domínio da frequência é configurável e deve ser pelo menos igual ao número máximo de requisições de usuário que podem ser escalonadas por TTI no domínio da frequência ( $UE_{FD}$ ). Este parâmetro é configurado de acordo com a largura de banda do sistema, as condições do canal dos usuários e os recursos disponíveis no PDCCH [16]. Finalmente, o algoritmo passa as requisições selecionadas para o escalonador no domínio da frequência (linha 19).

### 3.2.2 Função de prioridade

O valor de prioridade associado à requisição do UE  $u$ , no intervalo  $n$ , para o *bearer*  $i$ , é definido pela seguinte função de prioridade, denotada por  $M_{u_i}^{QoS}(n)$ :

$$M_{u_i}^{QoS}(n) = \begin{cases} \min(D_{u_i}^{GBR}(n), R_{u_i}(n)), & \text{para GBR} \\ D_{u_i}^{nGBR}(n), & \text{para nGBR} \end{cases} \quad (3.1)$$

onde  $D_{u_i}^{GBR}(n)$  e  $D_{u_i}^{nGBR}(n)$  são as métricas relacionadas com o atraso para o usuário  $u$  no intervalo  $n$  do *bearer*  $i$ , para os tipos de *bearers* GBR e nGBR, respectivamente.  $R_{u_i}(n)$  é a métrica relacionada com a taxa do UE  $u$  para o *bearer*  $i$  no intervalo  $n$ . Note que  $R_{u_i}(n)$  é exclusivo para *bearers* GBR, seguindo a especificação do 3GPP, o que faz com que o escalonador ZBQoS seja compatível com o padrão LTE.

Como dito anteriormente, embora seja necessário diferenciar requisições de *bearers* GBR das requisições de *bearers* nGBR, priorizar *bearers* GBR sobre *bearers* nGBR pode levar a perdas desnecessárias de requisições nGBR, e portanto ao desperdício da banda passante disponível. Para lidar com a configuração dinâmica de valores de prioridade, evitando, assim, este desperdício de banda passante, é aplicada uma função em forma de  $z$  (conhecida com *z-shaped*) à métrica relacionada com o atraso para *bearers* nGBR na equação 3.1.

**Algoritmo 1** Algoritmo ZBQoS

---

**entrada:**  $\mathcal{U}_{sch}$  //o conjunto de usuários com alguma requisição pendente  
 $\mathcal{R}$  //o conjunto das requisições dos usuários  
 $UE_{FD}$  //o número máximo de usuários a serem passados para o FDPS

**saída:**  $\mathcal{U}_{FD}$  //o conjunto de usuários a serem escalonados pelo FDPS

- 1: Seja  $M_{Sch}$  o vetor com as métricas de escalonamento dos usuários no TD
- 2:  $\mathcal{U}_{FD} \leftarrow \emptyset$
- 3: **para cada** usuário  $u \in \mathcal{U}_{sch}$  **faça**
- 4:    $v_{max} \leftarrow 2$  //Valor máximo que a métrica de escalonamento pode tomar
- 5:   **para cada** requisição  $i \in \mathcal{R}_u$  **faça** //  $\mathcal{R}_u$  é o conjunto de requisições do usuário  $u$
- 6:     Calcular  $m_{u_i}$ , o valor da métrica de escalonamento no domínio do tempo para a requisição  $i$  do usuário  $u$  de acordo com (3.1)
- 7:     **se**  $m_{u_i} < v_{max}$  **então**
- 8:        $v_{max} \leftarrow m_{u_i}$
- 9:     **fim se**
- 10:   **fim para**
- 11:    $M_{Sch}[u] \leftarrow v_{max}$
- 12: **fim para**
- 13: Ordenar  $\mathcal{U}_{sch}$  em ordem crescente segundo  $M_{Sch}$
- 14: Seja  $u$  o índice do primeiro usuário em  $\mathcal{U}_{sch}$
- 15: **enquanto**  $|\mathcal{U}_{FD}| < UE_{FD}$  e  $u < |\mathcal{U}_{sch}|$  **faça**
- 16:    $\mathcal{U}_{FD} \leftarrow \mathcal{U}_{FD} \cup \{UE_u\}$
- 17:    $u \leftarrow u + 1$
- 18: **fim enquanto**
- 19: Passar  $\mathcal{U}_{FD}$  para o escalonador no domínio da frequência

---

A função relaxada *z-shaped* é definida como:

$$f_z(x; a, b) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \leq a \\ 1 - 2 \left( \frac{x-a}{b-a} \right)^2, & \text{se } a < x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2 \left( \frac{x-b}{b-a} \right)^2, & \text{se } \frac{a+b}{2} < x \leq b \\ 0, & \text{se } x > b \end{cases} \quad (3.2)$$

onde  $x$  é a entrada da função e os parâmetros  $a$  e  $b$  delimitam a faixa de valores de  $x$  que correspondem à parte como declive na Figura 3.1.

A fim de empregar a função relaxada *z-shaped* para a métrica de escalonamento relacionada com o atraso, o fator  $x$  é usado como entrada da função *z-shaped*. Este fator dá uma medida de, quão perto está o atraso atual de um pacote na cabeça da fila (HoL) de

um *bearer* do seu limiar máximo de atraso (i.e., do PDB).

$$x = \frac{HoL_u^i(n)}{PDB^i} \quad (3.3)$$

onde  $HoL_u^i(n)$  é o atraso do pacote mais antigo na fila do *bearer*  $i$ , do UE  $u$ , no intervalo de tempo  $n$ .  $PDB^i$  é o atraso máximo suportado pelo *bearer*  $i$  e seu valor depende do QCI atribuído ao *bearer*  $i$ . Quando o valor de  $x$  é próximo de 1, o *bearer* tem alta prioridade porque o seu atraso encontra-se perto do *deadline*.

Diferentes expressões com base na função relaxada *z-shaped* foram testadas conjuntamente com o algoritmo de escalonamento e concluiu-se que as seguintes expressões isolam os *bearers* GBR dos nGBR, quando o valor de  $x$  associado com a requisição encontra-se perto de 1 (o que dá aos *bearers* GBR nessa situação, maior prioridade sobre qualquer *bearer* nGBR).

A métrica relacionada com o atraso para *bearers* nGBR é definida como:

$$D_{u_i}^{nGBR}(n) = 2 - x + f_z(x; 0.7, 0.85) - f_z(x; 0.85, 1) \quad (3.4)$$

enquanto a métrica relacionada com o atraso para *bearers* GBR é definida como:

$$D_{u_i}^{GBR}(n) = 1 - x. \quad (3.5)$$

Essas duas métricas dão prioridade absoluta para *bearers* GBR com valores de  $x$  maiores que 0,85. Isto permite garantir a QoS requerida por esse tipo de *bearers* bem como aproveitar melhor os recursos com tráfego nGBR, quando as requisições GBR têm valores baixos de  $x$ . Os *bearers* nGBR somente têm aumentada sua prioridade quando o valor de  $x$  é maior que 0,7. Esse projeto de escalonador garante a QoS requerida pelos fluxos transportados nos *bearers* GBR, enquanto melhora a vazão agregada do sistema.

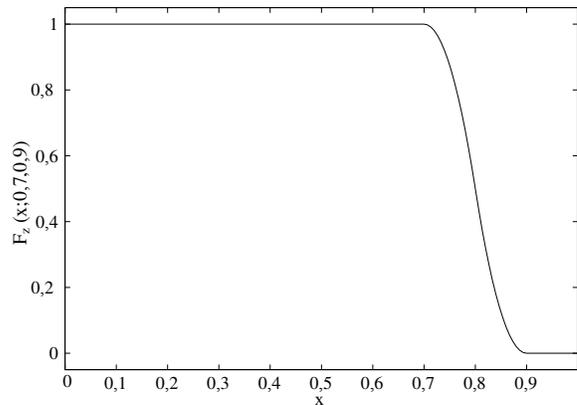


Figura 3.1: Função *z-shaped* relaxada com parâmetros  $a = 0,7$  e  $b = 0,9$ .

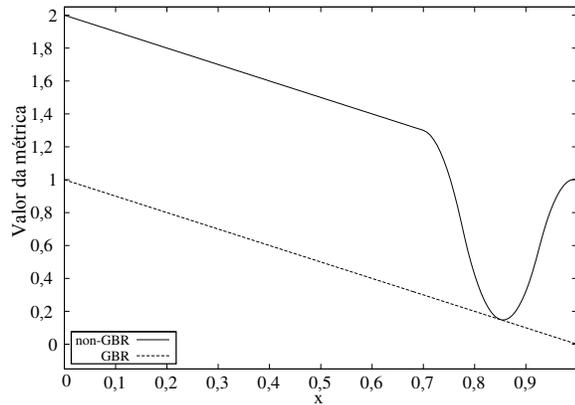


Figura 3.2: Valor da métrica relacionada ao atraso para *bearers* GBR e nGBR em função do fator  $x$ .

A figura 3.2 mostra o valor da métrica relacionado ao atraso para *bearers* GBR e nGBR em função do parâmetro  $x$ . É interessante notar que *bearers* GBR sempre têm maior prioridade do que *bearers* não nGBR com valores de  $x$  iguais (quanto maior o valor da métrica, menor é a prioridade). No entanto, para valores de  $x$  maiores que 0,75, quando o valor da métrica para *bearers* nGBR é inferior a 1, um *bearer* nGBR pode ter prioridade maior do que um *bearer* GBR com valor baixo de  $x$  associado a ele.

Dado que, *bearers* GBR têm requisitos de atraso bem como de taxa mínima garantida, foi definida a seguinte métrica relacionada com a taxa para *bearers* GBR:

$$R_{u_i}(n) = \frac{R_{sch_{u_i}}(n)}{GBR_u^i} \quad (3.6)$$

onde  $GBR_u^i$  é a taxa de bit mínima garantida para o *bearer*  $i$  do UE  $u$  e  $R_{sch_{u_i}}(n)$  é a taxa média ponderada<sup>3</sup> dada para o *bearer*  $i$ , do UE  $u$ , no intervalo  $n$ , e definida como:

$$R_{sch_{u_i}}(n) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{T_{TD}}\right) R_{sch_{u_i}}(n-1) + \frac{1}{T_{TD}} \hat{r}_{sch_{u_i}}(n-1), & \text{se o bearer } i \text{ do UE } u \text{ foi es-} \\ & \text{calonado no intervalo } n-1 \\ \left(1 - \frac{1}{T_{TD}}\right) R_{sch_{u_i}}(n-1), & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.7)$$

onde  $T_{TD}$  é a duração da janela usada para a medição da taxa de bit experimentada pelo *bearer*  $i$  do usuário  $u$ .  $\hat{r}_{sch_{u_i}}(n-1)$  é a taxa instantânea alcançada pelo UE  $u$  no intervalo  $n-1$ .

O valor da métrica relaciona à taxa é perto de 0 quando o *bearer*  $i$  não tiver muitas oportunidades de transmissão no período  $T_{TD}$  e perto de 1 quando a taxa de bit mínima

<sup>3</sup> $R_{sch_{u_i}}(n)$  é calculada usando *exponentially weighted moving average* (EWMA).

para esse *bearer* for provisionada no período de medição.

Dado que, em redes LTE, o escalonamento no sentido *uplink* é por usuário e não por *bearer*, precisa-se definir uma função de prioridade que leve em conta esta restrição na alocação dos recursos *uplink*. A função de prioridade com QoS apresentada na equação (3.1) é definida para um UE com um único *bearer*  $i$  com solicitação de recursos no intervalo  $n$ . Para UEs com múltiplos *bearers*, a métrica de escalonamento é calculada da seguinte forma:

$$\min M_{u_i}^{QoS}(n), \forall i \in \mathcal{R}_u \quad (3.8)$$

onde  $\mathcal{R}_u$  é o conjunto de *bearers* pertencentes ao UE  $u$  com requisição de recursos *uplink* no intervalo  $n$ .

Em redes LTE, quando um UE tem mais do que 4 *bearers*, todos eles são agrupados no máximo em 4 *radio bearer groups* (RBGs), para reduzir o *overhead* de sinalização [34]. Cada RBG contém *bearers* com requisitos de QoS similares. Os requisitos de QoS que devem ser usados na equação (3.8) são aqueles relacionados com o *bearer* mais restritivo no RBG.

### 3.2.3 Análise da complexidade

A complexidade do algoritmo ZBQoS é analisada a seguir. O cálculo das métricas de escalonamento toma  $n \times b$  passos, onde  $n$  é o número de usuários com requisições de escalonamento *uplink* e  $b$  é o número de *bearers*,  $b \in \{1, 2, 3, 4\}$ , portanto  $b$  é uma constante. A ordenação das métricas de prioridade toma  $n \log n$  passos (assumindo um algoritmo como *mergesort*) e a seleção dos primeiro  $UE_{FD}$  toma  $UE_{FD}$  passos, onde  $UE_{FD}$  é uma constante que depende da largura de banda do sistema, portanto, a complexidade do algoritmo ZBQoS é  $\mathcal{O}(n \log n)$ .

## 3.3 Escalonamento no domínio da frequência

Como dito anteriormente, o escalonador no domínio da frequência foca no aproveitamento da diversidade de usuários e das variações na qualidade do canal para utilizar os recursos (PRB) de maneira eficiente. Dado que, esta dissertação foca na provisão de QoS e, portanto, concentra-se no escalonador no domínio do tempo, utilizou-se uma versão modificada do algoritmo *first maximum expansion* (FME) [59] no domínio da frequência. FME é um dos algoritmos no domínio da frequência mais utilizados na avaliação de desempenho de escalonadores LTE *uplink* [5].

### 3.3.1 Algoritmo de escalonamento

A fim de aprimorar o desempenho do escalonador no domínio da frequência, o algoritmo FME utilizado neste trabalho (Algoritmo 2) leva em consideração o tamanho do *buffer* dos UEs, além de verificar o valor da função de prioridade no domínio da frequência, no momento da atribuição dos PRBs (linhas 8 e 18). Assim, evita-se o desperdício desnecessário de recursos, pois como foi originalmente projetado, o algoritmo FME pode alocar recursos além do necessário para um usuário. O algoritmo FME, também, foi modificado para levar em consideração as restrições impostas pelo PDCCH (linha 11), pois a versão original não as considerava. A descrição completa do algoritmo FME pode ser encontrada em [59].

### 3.3.2 Função de prioridade

A versão original do algoritmo FME, como proposto em [59], emprega a métrica de escalonamento *proportional fair* (PF) [63], que provê um bom *trade-off* entre eficiência espectral e justiça [39]. A métrica de escalonamento PF no domínio da frequência é definida como:

$$M_{u,r}(n) = \frac{\hat{R}_{u,r}(n)}{\overline{R_u(n)}} \quad (3.9)$$

onde,  $M_{u,r}(n)$  é o valor da métrica de escalonamento no domínio da frequência para o usuário  $u$  no PRB  $r$  no intervalo  $n$ ;  $\hat{R}_{u,r}(n)$  é a taxa de bit alcançável pelo usuário  $u$  no PRB  $r$  no intervalo de tempo  $n$ ;  $\overline{R_u(n)}$  é a taxa de bit média ponderada do usuário  $u$  na janela de medição da vazão  $T_{FD}$  para o intervalo de tempo  $n$  e é dada pela seguinte equação:

$$\overline{R_u(n)} = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{T_{FD}}\right) \overline{R_m(n-1)} + \frac{1}{T_{FD}} \hat{r}_m(n-1), & \text{se o UE } u \text{ foi escalonado} \\ \left(1 - \frac{1}{T_{FD}}\right) \overline{R_m(n-1)}, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.10)$$

onde,  $\overline{R_m(n-1)}$  é a taxa de bit média ponderada do usuário  $u$  na janela de medição da vazão  $T_{FD}$  para o intervalo de tempo  $n-1$ ;  $\hat{r}_m(n-1)$  é a taxa de bit alcançada pelo usuário  $u$  no PRB  $r$  no intervalo de tempo  $n-1$ .

O algoritmo FME será testado com uma métrica de escalonamento puramente de qualidade do canal para alocação dos recursos aos usuários. Para tal, foi utilizada a métrica de escalonamento *maximum throughput* (MT) baseado no *channel state information* (CSI) [58]. A versão modificada do algoritmo FME (sem a restrição do número máximo de usuários escalonados por TTI) em conjunto com a métrica de escalonamento MT, encontra-se disponível publicamente, no código fonte do simulador LTE-Sim [53].

**Algoritmo 2** Algoritmo FME modificado

---

**entrada:**  $\mathcal{I}$  //o conjunto de PRBs disponíveis para serem alocados aos usuários  
 $\mathcal{U}_{FD}$  //o conjunto de usuários a serem escalonador pelo escalonador FD  
 $N_{UE}$  //o número máximo de usuários que podem ser escalonados por TTI

**saída:**  $\mathcal{U}_{srv}$  //o conjunto de usuários servidos pelo escalonador no FD

- 1: Seja  $M_{FD}$  a matriz com as métricas de escalonamento dos usuários no FD
- 2: Seja  $R_{PRB}$  o vetor com o número de PRBs requeridos pelos usuários
- 3:  $\mathcal{U}_{srv} \leftarrow \emptyset$
- 4: **para cada** UE  $u \in \mathcal{U}_{FD}$  **faça**
- 5:   **para cada** PRB  $r \in \mathcal{I}$  **faça**
- 6:     Calcular a métrica de escalonamento no FD do UE  $u$  no PRB  $r$ , denotada por  $M_{FD}[u, r]$
- 7:   **fim para**
- 8:   Calcular a quantidade de PRB requeridos pelo UE  $u$ , denotada por  $R_{PRB}[u]$
- 9:    $\mathcal{I}_u \leftarrow \emptyset$
- 10: **fim para**
- 11: **enquanto**  $\mathcal{I} \neq \emptyset$  e  $\mathcal{U}_{FD} \neq \emptyset$  e  $|\mathcal{U}_{srv}| \leq N_{UE}$  **faça**
- 12:   Encontrar UE  $u \in \mathcal{U}_{FD}$  e PRB  $r \in \mathcal{I}$ , com a máxima prioridade em  $M_{FD}$
- 13:   Alocar o PRB  $r$  ao usuário  $u$ :  $\mathcal{I}_u \leftarrow \mathcal{I}_u \cup \{PRB_r\}$
- 14:   Tirar o PRB  $r$  do conjunto de PRBs disponíveis:  $\mathcal{I} \leftarrow \mathcal{I} \setminus \{PRB_r\}$
- 15:   Colocar UE  $u$  na lista de usuários servidos pelo escalonador:  $\mathcal{U}_{srv} \leftarrow \mathcal{U}_{srv} \cup \{UE_u\}$
- 16:    $r_l \leftarrow r - 1$
- 17:    $r_r \leftarrow r + 1$
- 18:   **enquanto** ( $|\mathcal{I}_u| < R_{PRB}[u]$ ) e ( $\mathcal{I} \neq \emptyset$ ) **faça**
- 19:     **se**  $r_l \geq 1$  e PRB  $r_l \in \mathcal{I}$  e  $M_{FD}[u, r_l] > M_{FD}[u, r_r]$  **então**
- 20:       Alocar PRB  $r_l$  ao UE  $u$ :  $\mathcal{I}_u \leftarrow \mathcal{I}_u \cup \{PRB_{r_l}\}$
- 21:       Tirar PRB  $r_l$  do conjunto de PRBs disponíveis:  $\mathcal{I} \leftarrow \mathcal{I} \setminus \{PRB_{r_l}\}$
- 22:        $r_l \leftarrow r_l - 1$
- 23:     **senão se**  $r_r \leq N_{PRB}$  e PRB  $r_r \in \mathcal{I}$  e  $M_{FD}[u, r_r] \geq M_{FD}[u, r_l]$  **então**
- 24:       Alocar o PRB  $r_r$  ao usuário  $u$ :  $\mathcal{I}_u \leftarrow \mathcal{I}_u \cup \{PRB_{r_r}\}$
- 25:       Tirar o PRB  $r_r$  do conjunto de PRBs disponíveis:  $\mathcal{I} \leftarrow \mathcal{I} \setminus \{PRB_{r_r}\}$
- 26:        $r_r \leftarrow r_r + 1$
- 27:     **fim se**
- 28:   **fim enquanto**
- 29: **fim enquanto**

---

### 3.4 Avaliação de desempenho

Nesta seção, avalia-se o desempenho do escalonador LTE *uplink* no domínio do tempo, usando o simulador LTE-Sim, versão 4.0 [53]. Este é um simulador baseado em eventos discretos para redes LTE desenvolvido em C++. Este simulador é amplamente utilizado

para simular funções MAC da E-UTRAN. Melhorou-se a implementação da parte *uplink* do simulador e acrescentou-se o suporte para QoS nas transmissões *uplink*. Implementou-se a abordagem de escalonamento *uplink* em dois estágios, isto é, dividiu-se a tarefa de escalonamento no domínio do tempo e no domínio da frequência. O escalonador empregado no domínio do tempo foi o escalonador ZBQoS descrito na Seção 3.2 e no domínio da frequência foi empregado o escalonador FME modificado apresentado na Seção 3.3 .

Em todos os gráficos, os valores médios são traçados com intervalos com nível de confiança de 95 % e derivados usando o método de replicação independente. As métricas de atraso médio por pacotes, taxa de perdas de pacotes (PLR), vazão média por UE e o índice de justiça intra-classe foram usadas para comparação. Todas estas métricas são apresentadas por classe de tráfego em função do número de UEs na célula.

### 3.4.1 Cenário de simulação

O cenário de simulação é composto de uma única célula com um eNB e vários UEs (variando de 5 à 150, com incrementos de 5). Os usuários foram uniformemente distribuídos na célula e para cada dois usuários transmitindo tráfego voz sobre IP (VoIP), tem-se dois usuários transmitindo tráfego de vídeo e um usuário transmitindo tráfego *constant bit rate* (CBR). Os tráfegos de vídeo e voz são transmitidos usando *bearers* GBR, enquanto o tráfego CBR, simulando tráfego *best-effort*, usa *bearers* nGBR.

A tabela 3.1 resume os modelos de tráfego utilizados nas simulações e seus correspondentes requisitos de QoS.

Quando o atraso de qualquer pacote for maior do que o PDB definido para o *bearer* ao qual pertence, o pacote é descartado. Este processo é realizado a cada oportunidade de transmissão pelo UE, antes do escalonamento intra-UE. As informações sobre o atraso do pacote na HoL de cada *bearer* são consideradas como disponíveis a cada TTI no eNB. A função HARQ, assim com MIMO, não foi utilizada. Além disso, como a avaliação do desempenho concentra-se no escalonamento, o controle de admissão não é utilizado no eNB. Os UEs são distribuídos no início da simulação e permanecem ativos ao longo do tempo de simulação. Para evitar a interferência do escalonamento intra-UE, assume-se que cada UE tem apenas um *bearer* com uma única classe de tráfego.

A tabela 3.2 resume os principais parâmetros usados na simulação.

### 3.4.2 Resultados de simulação

Esta subseção mostra os resultados dos experimentos realizados para avaliação do desempenho do escalonador proposto. Realizou-se, primeiramente, um experimento para determinar o impacto do número de usuários a serem passados pelo escalonador no domínio do tempo para o escalonador no domínio da frequência bem como da métrica de

escalonamento a ser utilizado no escalonador no domínio da frequência na provisão de QoS. Uma vez executado este experimento, comparou-se o desempenho do escalonador ZBQoS com o desempenho do escalonador no domínio do tempo chamado BQA, proposto em [47],[48]. Escolheu-se o escalonador BQA para comparação porque é um dos escalonadores mais recentes e que tem o mesmo objetivo de escalonamento que o escalonador ZBQoS: fornecer requisitos de QoS tais como garantias de atraso e taxa mínima garantida, enquanto tenta melhorar a vazão total do sistema.

### Experimento 1: Impacto de decisões de projeto do escalonador na provisão de QoS

O estudo apresentado neste seção visa responder duas questões relacionados com o projeto de escalonadores LTE de dois estágios e que pelo conhecimento dos autores, não foram abordadas ainda na literatura. A primeira questão procura definir como o número de usuários passados do escalonador no domínio do tempo para o escalonador no domínio da frequência afeta o desempenho da rede, isto é, como os requisitos de QoS e métricas de justiça, vazão da rede, são afetadas. A segunda, por outro lado, visa determinar como a métrica de escalonamento na qual se baseia a alocação dos recursos no domínio da frequência influencia o desempenho da rede.

Para responder essas questões, avalia-se o efeito desses dois critérios de projeto no desempenho de um escalonador de dois estágios, que usa no domínio do tempo o escalonador

Tabela 3.1: Modelo de tráfego e requisitos de QoS dos usuários móveis da rede LTE.

Serviço	VoIP	Vídeo	CBR
Descrição	G.729 Modelo ON/OFF	H.264 Baseado em <i>trace</i> <sup>a</sup>	1000 bytes cada 8 ms
Taxa de bit	12,2 kbps	128 kbps	1 Mbps
QCI	1	2	8
PDB	100 ms	150 ms	300 ms
GBR	12,2 kbps	128 kbps	N/A <sup>b</sup> 128 kbps <sup>c</sup>
Proporção	2 (40%)	2 (40%)	1 (20%)

<sup>a</sup> Usou-se o *trace* do vídeo Foreman, que se encontra disponível no simulador LTE-Sim [52].

<sup>b</sup> Para o escalonador ZBQoS.

<sup>c</sup> Para o escalonador BQA.

ZBQoS e no domínio da frequência o escalonador FME modificado com as métricas mais comuns no domínio da frequência: Proportional Fair e Maximum Throughput.

Neste experimento, testou-se unicamente o escalonador ZBQoS. Os parâmetros variados nesse experimento foram o número máximo de usuários que é passado pelo escalonador no domínio do tempo (ZBQoS) para o escalonador no domínio da frequência (FME), no conjunto  $\{5,7,9,11\}$ , e a métrica de escalonamento utilizada pelo escalonador no domínio da frequência. Neste estudo, o escalonador FME modificado com a métrica PF é chamado PF-FME e com a métrica MT é chamado MT-FME. Os objetivos deste experimento são determinar como o número de usuários passados para o algoritmo no domínio

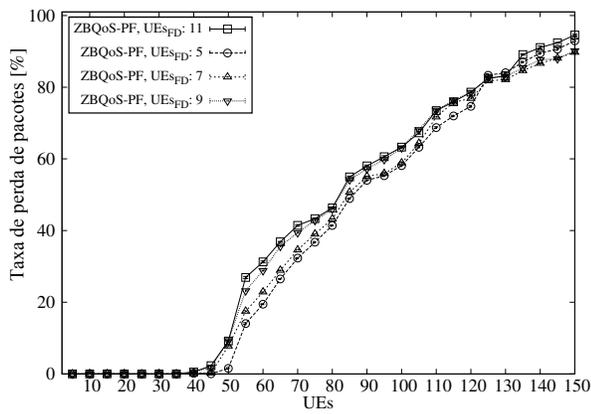
Tabela 3.2: Parâmetros de simulação para a rede LTE.

Parâmetro	Valor
Tipo de sistema	<i>single cell</i>
Radio da célula	0,5 km
Modelo de canal	<i>macro-cell urban model</i>
Número de UEs na célula	5-150
Velocidade do UE	3 km/h
Largura de banda do sistema	5 MHz
Número de blocos de Recurso	25 (BW por PRB: 180 KHz)
Frequência da portadora	2 GHz
Estrutura do quadro	FDD
Duração TTI	1 ms
Duração da Simulação	100.000 TTI (100 s)
Escalonador UL	TD: BQA, FD: PF-FME <sup>a</sup> TD: ZBQoS, FD: PF-FME/MT-FME <sup>b</sup>
Número max. de UEs passados para o FDPS	5 <sup>c</sup> , 7 <sup>b</sup> , 9 <sup>b</sup> , 11 <sup>b</sup>
Número max. de UEs escalonáveis por TTI	5 [47]
$T_{TD}$	50 ms
ROCH	Ativado
Número de replicações	5

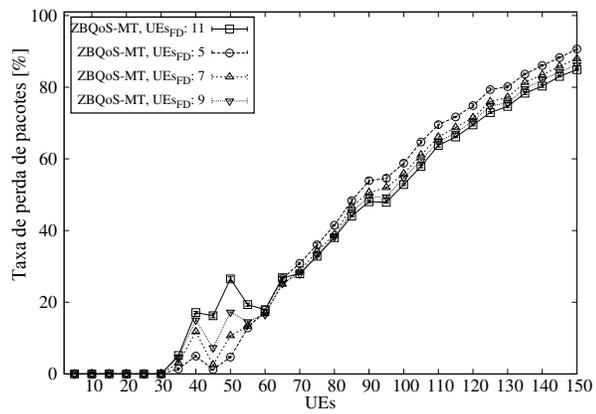
<sup>a</sup> Utilizado somente no Experimento 2.

<sup>b</sup> Utilizado somente no Experimento 1.

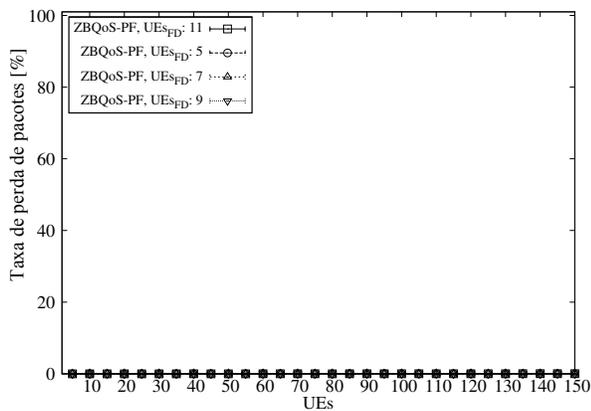
<sup>c</sup> Utilizado nos Experimentos 1 e 2.



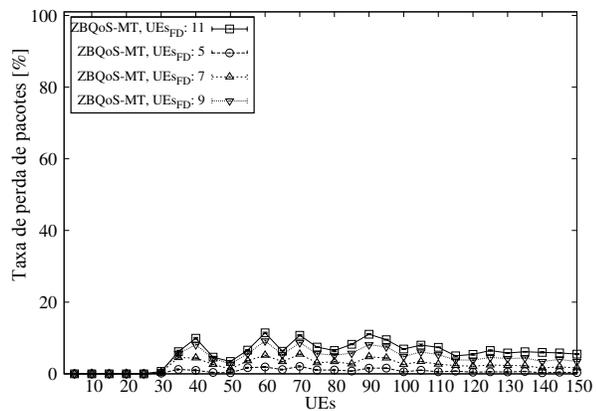
(a) Tráfego CBR - PF.



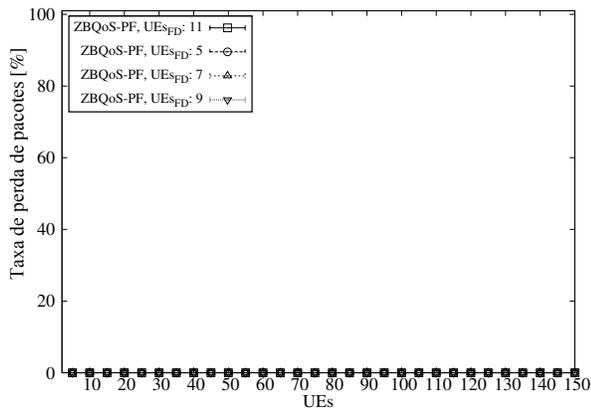
(b) Tráfego CBR - MT.



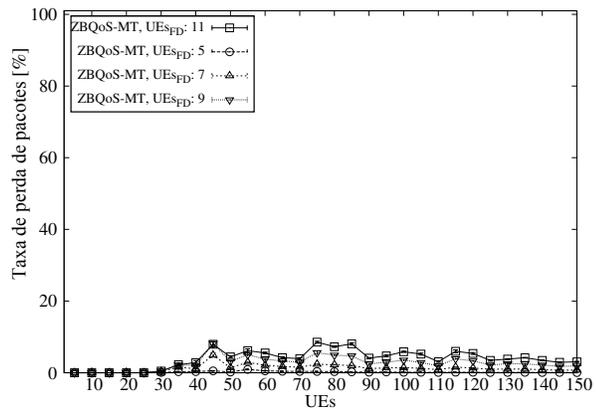
(c) Tráfego de vídeo - PF.



(d) Tráfego de vídeo - MT.



(e) Tráfego VoIP - PF.



(f) Tráfego VoIP - MT.

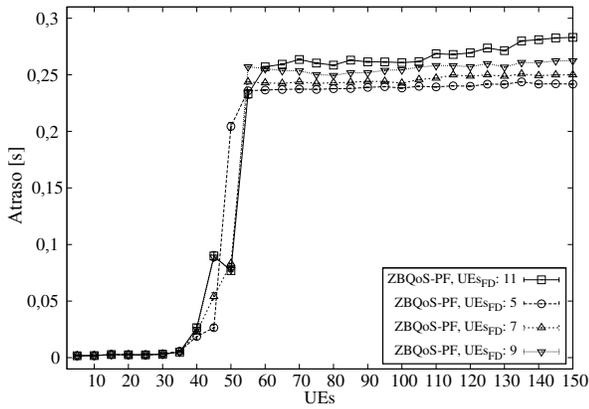
Figura 3.3: Taxa de perda de pacotes para o escalonador ZBQoS no domínio do tempo, o escalonador FME com métricas PF e MT no domínio da frequência, em função do número de usuários passados para o escalonador no domínio da frequência.

da frequência afeta a provisão de QoS, quando o grupo de usuários a ser escalonado é limitado por um algoritmo de escalonamento no domínio do tempo que leva em conta QoS (como é o caso do escalonador ZBQoS), mas que no domínio da frequência, a alocação do recurso é baseada no estado do canal. Além disso, pretende-se avaliar qual métrica de escalonamento tem melhor comportamento no domínio da frequência, quando se utiliza o algoritmo FME para a alocação dos recursos. Assim, pode-se também determinar qual é a melhor combinação desses parâmetros, para serem usados em experimentos futuros.

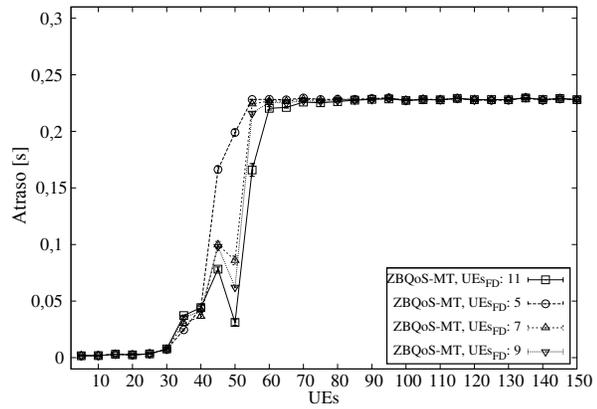
A figura 3.3 mostra a perda de pacotes quando se utiliza o escalonador ZBQoS no domínio do tempo, e o escalonador FME modificado no domínio da frequência, com métrica de escalonamento PF e MT. Neste gráfico, observa-se que quando a métrica PF é utilizada, a perda de pacotes para o tráfego CBR aumenta com o número de usuários passados pelo escalonador ZBQoS, enquanto a perda de pacotes para o tráfego de vídeo e voz, mantém-se nula. No entanto, quando a métrica MT é usada, a perda de pacotes diminui com o aumento do número de usuários no domínio da frequência, porém o impacto na QoS fornecida ao tráfego de tempo real é muito alto (figuras 3.3d e 3.3f). Como mencionado em [38], 1% é o valor máximo aceitável para o tráfego de vídeo sem afetar a qualidade de experiência dos usuários, enquanto 3% é o valor máximo aceitável para o tráfego de voz. As perdas de pacotes tanto para o tráfego de voz como para o tráfego de vídeo, para mais de 5 usuários no domínio da frequência, ultrapassa, amplamente, o limite máximo permitido, quando a métrica MT é usada. Essa perda de pacotes significativa, deve-se principalmente ao fato de que quanto mais usuários forem passados pelo escalonador no domínio do tempo, o algoritmo no domínio da frequência com métrica MT tem mais chance de achar usuários com fluxos *non-realtime* e com boa condição do canal, o que diminui a perda de pacotes experimentada por usuários com tráfego CBR, pois quando um usuário for escolhido, ele vai poder transmitir mais bytes utilizando os mesmos recursos em um TTI do que um usuário com fluxo *realtime* e com pior condição de canal. No entanto, isto ocasiona uma diminuição nos recursos destinados para usuários com tráfego *realtime*, o que ocasiona as altas perdas experimentadas por pacotes pertencentes a esse tipo de tráfego (figuras 3.3d e 3.3f).

A figura 3.4 apresenta o atraso médio para os três tipos de tráfego na simulação. Nota-se que, quando usada a métrica MT, o atraso não varia muito com o aumento do número de usuários passado para o escalonador no domínio da frequência. Quando usada a métrica PF, as variações no atraso vão se tornando mais significativas a medida que aumenta o número de usuários passados para o escalonador no domínio da frequência. Quando o atraso no tráfego *realtime* aumenta, o atraso do tráfego *non-realtime* diminui. É importante ressaltar que o atraso para todos os tipos de tráfego, encontra-se bem abaixo do PDB para cada classe de tráfego.

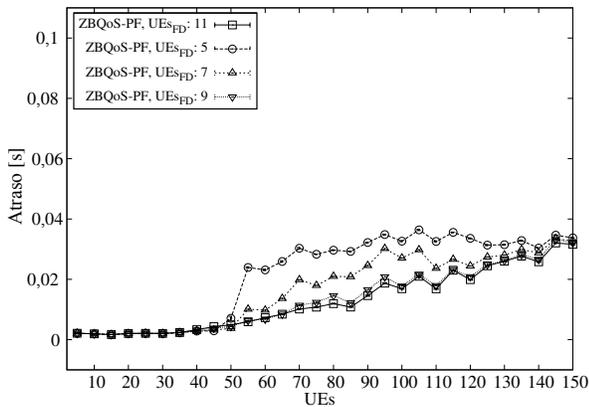
A figura 3.5 mostra o índice de Jain [37] da vazão por *bearer* para usuários com tráfego



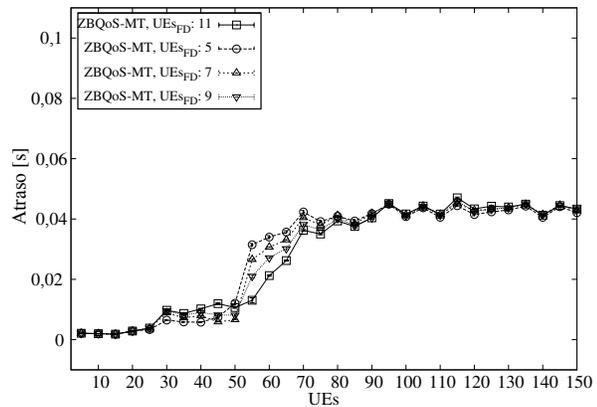
(a) Tráfego CBR - PF.



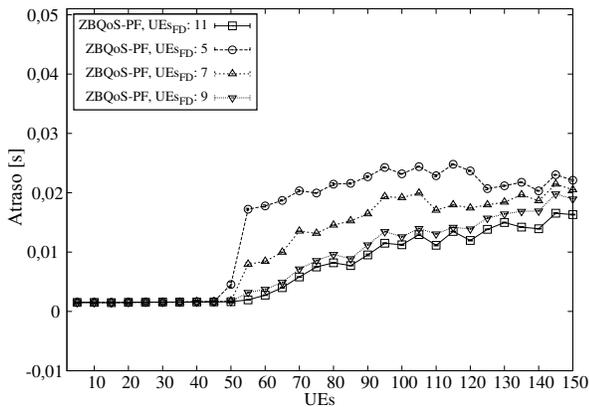
(b) Tráfego CBR - MT.



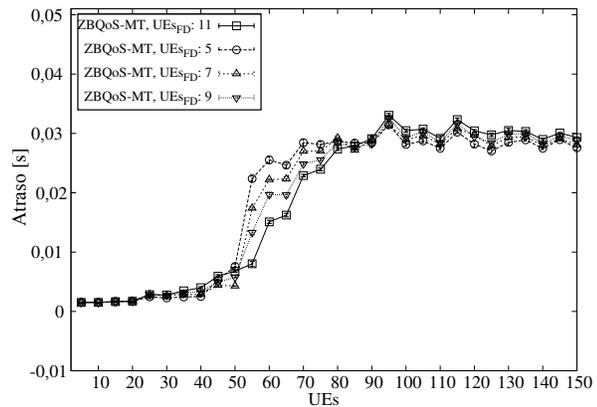
(c) Tráfego de Vídeo - PF.



(d) Tráfego de Vídeo - MT.



(e) Tráfego VoIP - PF.



(f) Tráfego VoIP - MT.

Figura 3.4: Atraso médio de pacotes para o escalonador ZBQoS no domínio do tempo, o escalonador FME com métricas PF e MT no domínio da frequência, em função do número de usuários passados para o escalonador no domínio da frequência.

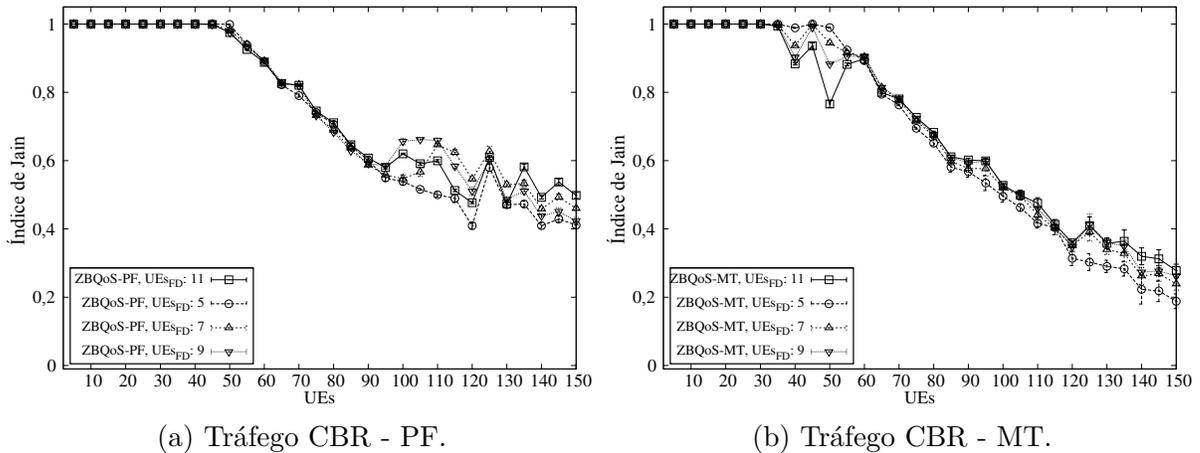


Figura 3.5: Índice de Jain para o escalonador ZBQoS no domínio do tempo, o escalonador FME com métricas PF e MT no domínio da frequência, em função do número de usuários passados para o escalonador no domínio da frequência.

CBR. Este índice é uma medida da justiça do escalonador, neste caso, entre usuários da mesma classe de serviço, ou seja, o *intra-class fairness index*. Como era esperado, a métrica MT apresenta índices de justiça menores do que os valores gerados com a métrica PF. Isto se deve ao fato de que usuários *non-realtime* recebem um tratamento mais desigual quando a métrica MT é utilizada, pois esta métrica apenas leva em consideração o estado do canal. No entanto, esses valores são particularmente bastante baixos, tanto para a métrica MT como para PF, o que indica que a justiça neste caso é determinada, principalmente, pelo escalonador no domínio do tempo. Os gráficos para os outros tipos de tráfego não foram mostrados, pois apresentam um índice próximo de 1 para todos os valores de UEs na célula.

## Experimento 2: Comparação do desempenho

Baseado no experimento anterior, foi escolhida a métrica de escalonamento no domínio da frequência que vai ser usada neste experimento e a quantidade máxima de usuários que o escalonador no domínio do tempo vai passar para o escalonador no domínio da frequência. A métrica PF apresentou melhor comportamento em relação à QoS, e bom *trade-off* entre vazão e justiça. Determinou-se, também, que no máximo 5 usuários devem ser passados para o escalonador no domínio da frequência, pois este número apresenta os melhores resultados, dado que para valores maiores, a perda de pacotes para o tráfego CBR aumenta sem uma melhora significativa na QoS quando a métrica PF é utilizada.

Neste experimento, o desempenho da proposta de escalonamento LTE *uplink* no domínio do tempo foi comparado com o desempenho de outro escalonador, chamado BQA,

recentemente proposto em [47]. Apesar do escalonador BQA ter o mesmo objetivo do escalonador ZBQoS (garantir atraso e taxa mínima), ele não é compatível com o padrão, uma vez que utiliza parâmetros de *bearers* GBR para *bearers* nGBR. Com o objetivo de fazer uma comparação justa, o escalonador no domínio da frequência descrito na Seção 3.3 é usado na avaliação dos dois escalonadores.

O desempenho do escalonador foi analisado sob três faixas distintas de carga de tráfego na rede. Cenários com baixa carga (*underloaded*) compreendem de 5 UEs a 50 UEs e sob esta carga de tráfego, os requisitos de QoS são garantidos para todos os tipos de tráfego. Cenários com alta carga (*overloaded*) incluem de 55 UEs a 120 UEs e sob esta carga de tráfego os requisitos de QoS conseguem ser provisionados para tráfego *realtime* por ambos escalonadores, diminuindo a quantidade de recursos alocados para tráfego *non-realtime*. Em cenários sobrecarregados (*heavily loaded*) que compreende de 125 UEs a 150 UEs, apenas o escalonador proposto nesta dissertação consegue garantir QoS para tráfego *realtime*.

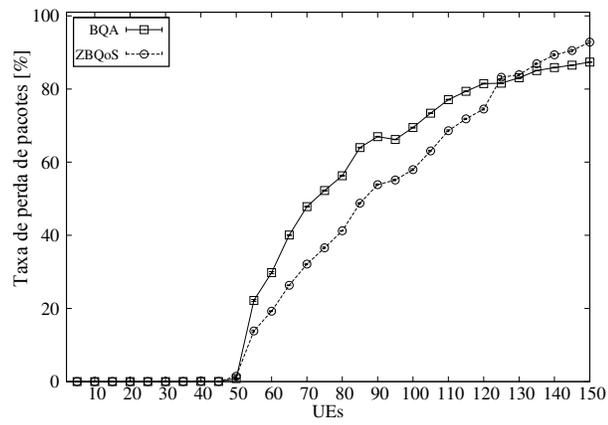
A figura 3.6a mostra a PLR para os usuários CBR. A medida que a carga na rede aumenta, a PLR, também, aumenta. O escalonador ZBQoS produz valores de PLR menores quando a rede está *overloaded*, porém os valores de PLR são um pouco mais elevados quando a rede está *heavily loaded*. No entanto, o valor inferior da PLR do tráfego CBR dado pelo escalonador BQA é obtido às custas da diminuição da QoS fornecida ao tráfego de vídeo; efeito este indesejável no desempenho do sistema.

O escalonador ZBQoS é capaz de fornecer serviço sem prejuízo para o tráfego de vídeo (figura 3.6b), o que não acontece com o serviço prestado pelo escalonador BQA. Além disso, a taxa de perda de pacotes produzidos pelo escalonador BQA aumenta com a carga de tráfego, chegando a 15 % sob a faixa *heavily loaded*.

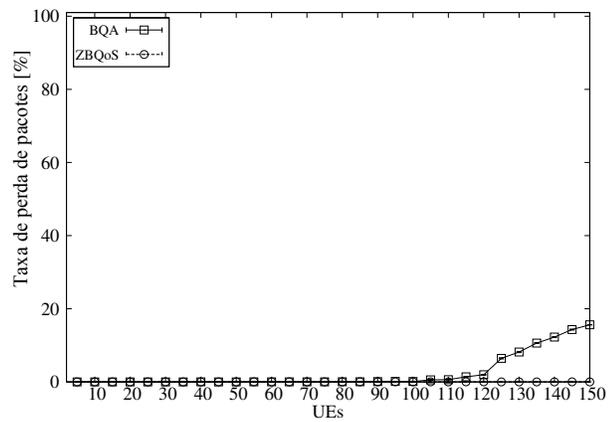
A figura 3.6c mostra como ambos os escalonadores produzem um serviço sem prejuízo para o tráfego de VoIP, como consequência de sua baixa demanda de largura de banda e requisitos rigorosos de atraso, o que dá uma alta prioridade no escalonamento.

As figuras 3.7a e 3.7b mostram a vazão média por usuário para tráfego CBR e de vídeo, respectivamente. Estes gráficos mostram que a falta de capacidade do escalonador BQA para priorizar o tráfego de vídeo leva à incapacidade de garantir a taxa mínima para este tráfego (figura 3.7b). O escalonador proposto diminui a taxa do tráfego CBR (*best-effort*, figura 3.7a) para suportar o requisito de QoS de taxa mínima do tráfego de vídeo sob cenários *heavily loaded*.

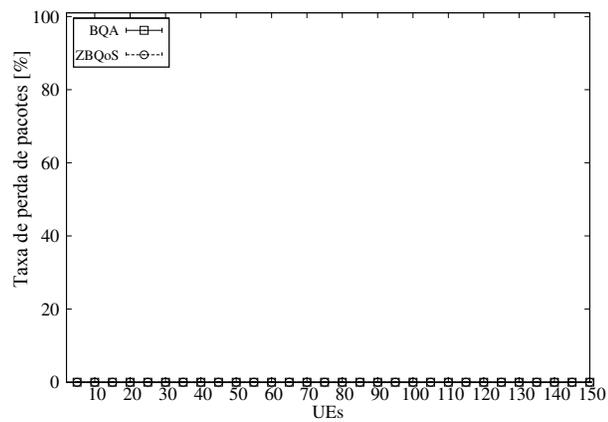
As figuras 3.8a, 3.8b e 3.8c mostram o atraso médio para tráfego de vídeo, VoIP e CBR, respectivamente. Para todos os tipos de tráfego, o desempenho de ambos escalonadores é igual, em cenários *underloaded*. O escalonador ZBQoS produz atrasos menores do que o escalonador BQA para o tráfego de vídeo sob cenários *heavily loaded*. Os valores de atraso podem ser até 50 % menores daqueles que recebidos quando se utiliza o escalonador BQA.



(a) Tráfego CBR.

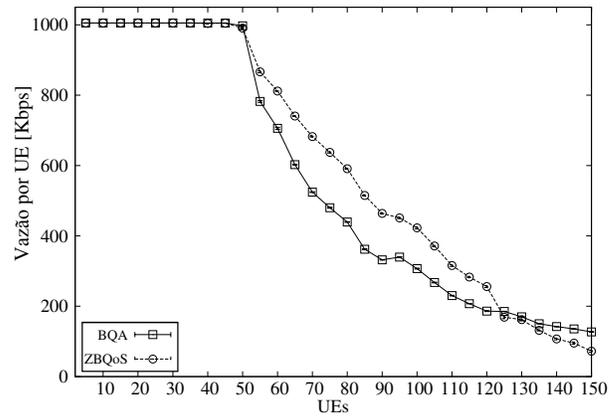


(b) Tráfego de vídeo.

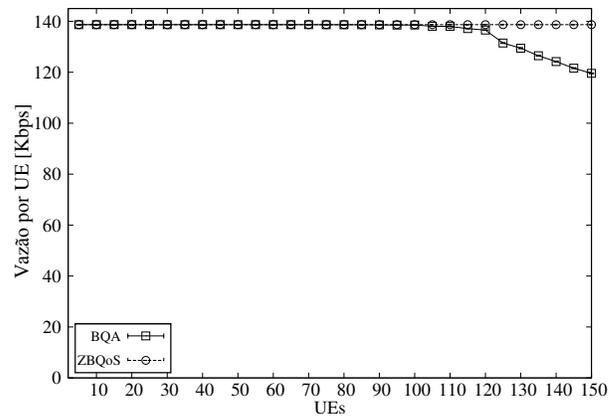


(c) Tráfego VoIP.

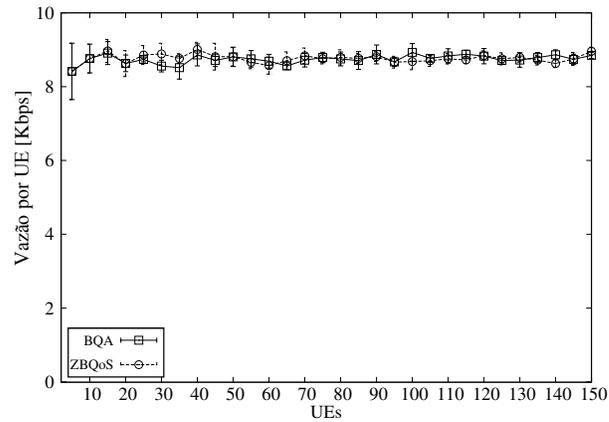
Figura 3.6: Taxa de perda de pacotes produzida pelos escalonadores ZBQoS e BQA, em função do número de usuários na célula.



(a) Tráfego CBR.

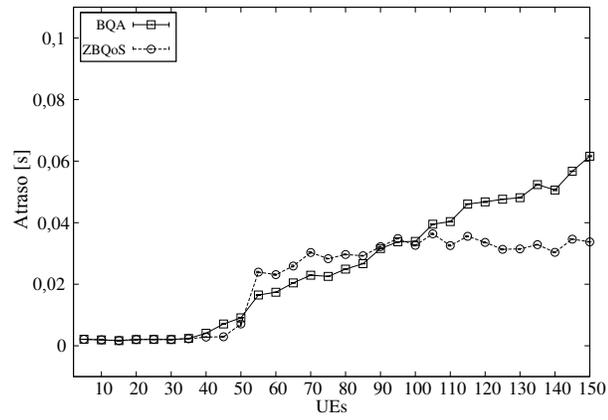


(b) Tráfego de vídeo.

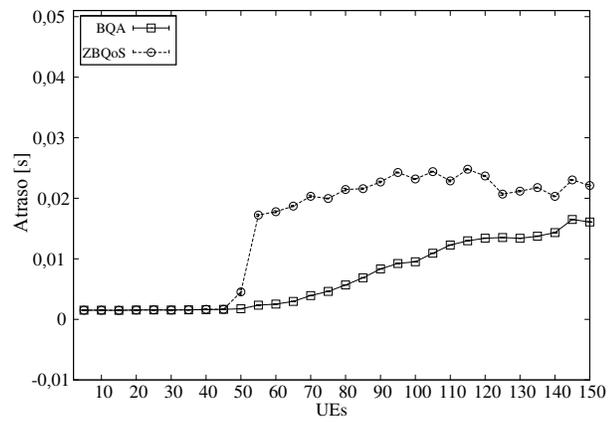


(c) Tráfego VoIP.

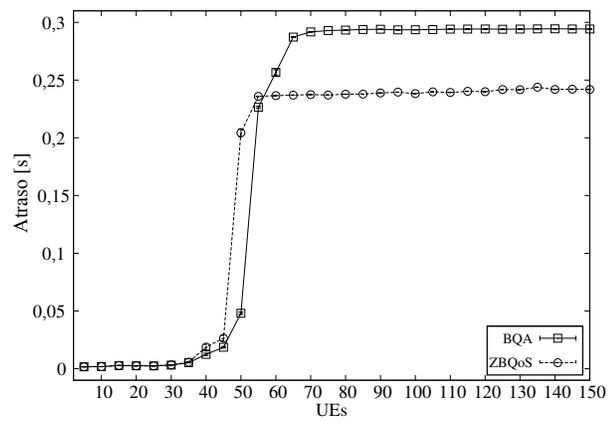
Figura 3.7: Vazão média por UE produzida pelos escalonadores ZBQoS e BQA, em função do número de usuários na célula.



(a) Tráfego de vídeo.



(b) Tráfego VoIP.



(c) Tráfego CBR.

Figura 3.8: Atraso médio dos pacotes produzido pelos escalonadores ZBQoS e BQA, em função do número de usuários na célula.

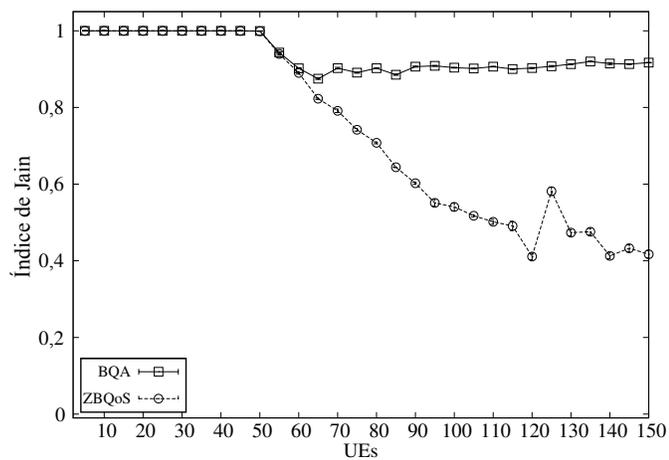
Os atrasos produzidos pelo escalonador ZBQoS para o tráfego VoIP são maiores do que aqueles produzidos pelo escalonador BQA quando a rede está sobrecarregada, mas ainda encontram-se bem abaixo do limiar máximo de atraso deste tipo de tráfego. Além disso, o atraso produzido pelo escalonador ZBQoS é em torno de 20% menor do que o atraso produzido pelo escalonador BQA para o tráfego CBR.

A figura 3.9 mostra o índice de Jain [37] da vazão por *bearer* para todos os tipos de tráfego nas simulações. Esses gráficos mostram o custo associado à melhoria na vazão mostrada na figura 3.7. Uma das desvantagens do escalonador ZBQoS é que ele não fornece serviço equilibrado para os *bearers* nGBR. Sob cenários sobrecarregados, alguns *bearers* são capazes de obter uma vazão maior do que outros. Isto acontece por causa da métrica de escalonamento do escalonador ZBQoS para *bearers* nGBR, pois não leva em consideração os *grants* já dados a cada *bearer*. Esse desequilíbrio não acontece quando o escalonador BQA é utilizado. Para o tráfego de voz (figura 3.9c) e vídeo (figura 3.9b), ambos os escalonadores proporcionam um tratamento justo, evidenciado pelos valores do índice de Jain muito próximos de 1.

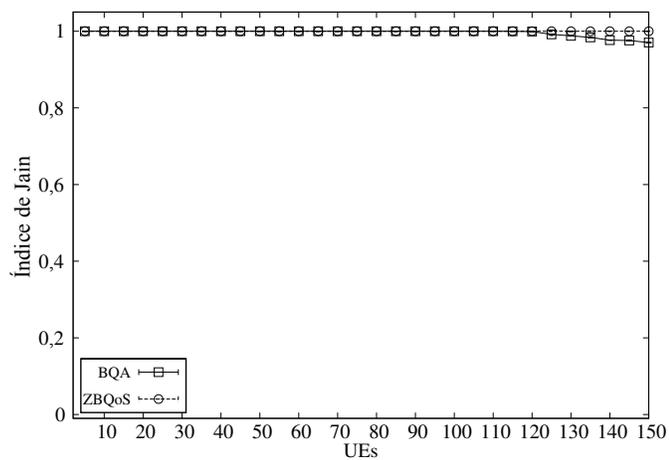
### 3.5 Resumo conclusivo

Este capítulo introduziu um novo escalonador de pacotes *uplink* para o eNB, chamado ZBQoS, que provê suporte a requisito de QoS. ZBQoS é compatível com o padrão LTE e fornece garantias de latência e taxa mínima, respeitando os requisitos de QoS. Foi investigado, primeiramente, o efeito que tem algumas decisões de projeto do escalonador dois estágios na provisão de QoS. Mostrou-se que uma quantidade de usuários passados para o escalonador no domínio da frequência maior do que o número máximo de usuários escalonáveis por TTI degrada fortemente a QoS fornecida aos *bearers* GBR quando a métrica de escalonamento MT é empregada. Mostrou-se, também, que a PLR dos *bearers* nGBR aumenta quando a métrica PF é utilizada, causando uma diminuição na vazão agregada da rede. Em resumo, a métrica de escalonamento PF tem melhor desempenho que MT do ponto de vista de QoS. Evidencia-se que existe um *trade-off* entre QoS e vazão que precisa ser contornado.

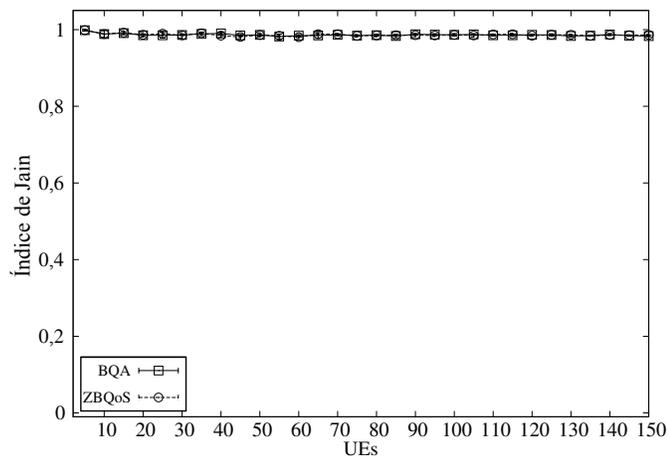
O desempenho do escalonador ZBQoS, foi comparado com o do escalonador BQA, recentemente proposto, e que também fornece suporte à requisitos de QoS. Os resultados desta avaliação mostraram que o escalonador ZBQoS provê menor PLR que o escalonador BQA tanto para usuários GBR como nGBR, o que implica em uma vazão maior e portanto melhor utilização dos recursos de rádio. Além disto, o escalonador BQA produz valores de PLR maior do que a taxa máxima aceitável para tráfego de vídeo em cenários com alta quantidade de usuários. O escalonador ZBQoS, também, reduz o atraso do tráfego de tempo real em até 50% sob carga pesada.



(a) Tráfego CBR.



(b) Tráfego de Vídeo.



(c) Tráfego VoIP.

Figura 3.9: Índice de Jain produzido pelos escalonadores ZBQoS e BQA, em função do número de usuários na célula.



# Capítulo 4

## Provisão de QoS em Redes Integradas LTE-EPON

O Capítulo 3 propôs um novo escalonador LTE *uplink* para suporte de QoS, que realiza priorização dinâmica de usuários móveis e se adapta às condições de tráfego dos seus diferentes usuários para melhorar o desempenho. Resultados derivados via simulação evidenciaram que a utilização do escalonador aumenta significativamente a vazão total da célula, enquanto garante requisitos de QoS às diferentes aplicações, inclusive sob condições de alta carga de tráfego na rede. Entretanto, esse escalonador, bem como outros existentes na literatura, não leva em consideração o estado do enlace da rede *backhaul* no momento da alocação dos recursos para transmissão, o que pode potencialmente degradar a QoS fornecida aos usuários móveis em condições de congestionamento bem como levar a desperdício dos recursos de rádio e do *backhaul*.

Para conseguir lidar com a variabilidade da capacidade do enlace da rede *backhaul* e prover QoS aos usuários móveis em uma rede integrada LTE-EPON, este capítulo introduz um *framework* para provisão de QoS nessas redes. O *framework* foi proposto com o objetivo de melhorar a QoS fornecida aos usuários da rede móvel LTE e tirar proveito da variabilidade da capacidade do enlace *backhaul* em estações rádio base com *backhaul* óptico baseado em EPON. Este *framework* inclui uma proposta da arquitetura funcional do dispositivo integrado ONU-eNB, mapeamento de QoS entre redes LTE e EPON e um método para que escalonadores LTE existentes possam lidar com a variabilidade da largura de banda disponível em um enlace EPON. Para tal, prioriza-se dinamicamente as requisições de usuários considerando o estado da rede móvel bem como o enlace de *backhaul*. Além disto, o *framework* é independente do escalonador intra-ONU na OLT, assim como do escalonador inter-ONU no dispositivo ONU-eNB, e é compatível com os padrões das tecnologias EPON e LTE. Com a finalidade de mostrar os benefícios desse *framework*, o escalonador LTE *uplink* proposto no Capítulo 3 foi modificado para

se conseguir levar em consideração a variabilidade do enlace *backhaul* e melhorar, assim, o desempenho da rede.

Este capítulo está organizado da seguinte forma: Apresentam-se os principais trabalhos relacionados com provisão de QoS em redes integradas LTE-EPON e revisam-se alguns mecanismos RRM para redes LTE que levam em consideração o estado do enlace *backhaul* para melhorar o desempenho da rede (Seção 4.1). Descreve-se o funcionamento da rede integrada LTE-EPON (Seção 4.2) e propõe-se o *framework* para provisão de QoS nessas redes (Seção 4.3). Aplica-se o método proposto para modificar escalonadores LTE existentes no escalonador ZBQoS (Seção 4.4) e avalia-se o desempenho do *framework* proposto (Seção 4.5). Conclui-se o capítulo com algumas considerações finais (Seção 4.6).

## 4.1 Trabalhos relacionados

Existem poucos trabalhos na literatura que focam na provisão de QoS em redes LTE com *backhaul* baseado em PONs.

Chung *et al.* [18] propuseram um dos primeiros esquemas de provisão de QoS que emprega PONs para fazer o *backhauling* do tráfego de redes sem fio. A arquitetura de rede utilizada pelos autores foi a *two-upstream-wavelength PON* (2W-PON), na qual, as ONUs têm dois comprimentos de onda diferentes para transmissão *upstream*. O esquema prioriza tráfego de tempo real e pacotes de controle e sinalização, transmitindo-os em um comprimento de onda, enquanto o tráfego de baixa prioridade é enviado pelo outro comprimento de onda. No entanto, essa arquitetura não é comum nas atuais redes de acesso e o custo de implementação é maior, pois trabalha com dois comprimentos de onda diferentes para transmissão do tráfego *upstream*.

Alvarez *et al.* [7] introduziram um algoritmo DBA para *10-gigabit-capable PON* (XG-PON), chamado *group-gigapon access network* (gGIANT), o qual provê um mecanismo para que um SLA possa ser compartilhado por várias ONUs pertencentes a um mesmo assinante, por exemplo, um MNO que contrata o serviço de *backhauling* com uma operadora de rede. Com este mecanismo, os MNOs, fazendo uso da multiplexação estatística, podem tirar proveito da heterogeneidade da carga de tráfego de estações rádio base diferentes ligadas a um mesmo OLT. O principal problema com esta abordagem é que requer modificações nos dispositivos OLT das XGPON existentes. Além disto, o mecanismo somente provê benefícios quando a rede GPON não se encontra carregada e os tráfegos das estações rádio base é desbalanceado, pois para cenários com altas cargas de tráfego, os benefícios são mínimos.

Ranaweera *et al.* [55] introduziram um método de previsão de tráfego que aproveita as características intrínsecas de uma rede integrada LTE-EPON. Os autores analisaram o efeito do tamanho do ciclo EPON no fornecimento de QoS com diferentes mecanismos

de escalonamento na parte EPON. Eles mostraram que o desempenho dos esquemas de escalonamento EPON é afetado com a variação do tamanho do ciclo máximo e afirmam que este precisa ser corretamente selecionado, a fim de se obter desempenho ótimo, porém, este estudo considera somente redes com pouca carga. No entanto, em redes sob altas cargas, o impacto desse mecanismo no atraso é mínimo.

Lim *et al.* [46] propuseram dois esquemas de mapeamento de QoS para redes integradas LTE-GPON. O primeiro esquema é chamado *one-to-one mapping*, que faz mapeamento um a um entre os QCIs LTE e as filas de prioridade GPON. Em situações nas quais o número de *bearers* LTE é maior do que o número de filas na ONU, um segundo esquema, chamado *group mapping* é proposto. Neste esquema, os *bearers* são mapeadas em três filas da ONU. Um grande problema dessa proposta é que estes esquemas dependem dos mecanismos de provisão de QoS da rede PON. Além disso, as redes OFDMA-GPON usadas na avaliação do desempenho da proposta ainda não foram implementadas pelas operadoras de rede ou MNOs.

Como apontado em [60], o problema do impacto da capacidade disponível nos enlaces da rede *backhaul* nas funções RRM das redes LTE têm recebido pouca atenção na literatura. Os trabalhos existentes que levam em consideração as limitações da capacidade do *backhaul*, focam, principalmente, em procedimentos para gerência de interferência na camada física utilizando CoMP [25] [49], também conhecido como *cooperative MIMO* ou *network MIMO*, e em mecanismo de *offloading* em *heterogeneous networks* (HetNets) [60], [62], [14], que empregam *backhaul* sem fio *in-band* [62], [60], [14] e *out-of-band* [60]. No entanto, pouca atenção tem sido dada à limitação da capacidade do enlace *backhaul* e como ela afeta a provisão de QoS, o desempenho do escalonamento e de outras funções RRM na camada MAC e superiores, tanto em macro células como em *smallcells*. Menos atenção tem sido dada aos mecanismos que conseguem lidar com essa variabilidade para melhorar o desempenho quando os enlaces *backhaul* estão sobrecarregados. Um dos poucos estudos nesta área pode ser encontrado no trabalho de Ghimire e Rosenberg [30], que mostra o efeito da capacidade do *backhaul* no desempenho do escalonamento em HetNets. Os autores mostram, também, que o escalonamento deve ser diferente se o enlace *backhaul* com capacidade limitada é considerado. O escalonador utilizado pelos autores é baseado em uma métrica PF, portanto, não considera a provisão de QoS e supõe, ainda, que a macro célula possui *backhaul* infinito.

Em resumo, as propostas anteriores não resolvem o problema de lidar com a variabilidade na largura de banda e com a provisão de requisitos de QoS dos usuários móveis em uma rede integrada LTE-EPON sob essa condição. Além disso, os mecanismos de mapeamento de QoS não consideram que a carga de tráfego de usuários fixos na ONU e o algoritmo DBA na OLT podem impactar diretamente a provisão de QoS dos usuários móveis. Eles também não consideram redes implantadas para redução dos custos no

*backhaul* e adicionam requisitos de provisão de QoS na rede PON, o que impede a adoção rápida das propostas pelas MNOs e operadoras de rede.

## 4.2 Arquitetura integrada

Nesta dissertação, considera-se um dispositivo integrado ONU-eNB, de uma arquitetura de redes *híbridas* ou *integradas* (Seção 2.3), que permite a integração do *software* e *hardware* da ONU como os da eNB em um único dispositivo físico. Além da redução do custo do conjunto ONU-eNB, a principal vantagem da arquitetura híbrida, explorada neste trabalho, é a da disponibilidade de informações de alocação de recursos e de escalonamento, entre outras funções RRM da camada física e MAC, que podem ser compartilhadas entre a ONU e o eNB, para melhorar o desempenho final da rede integrada.

Em tais redes integradas, o eNB é um cliente da EPON através da ONU. Assim a largura de banda concedida pelo OLT para o dispositivo ONU-eNB deve ser distribuída entre os diferentes fluxos dos usuários móveis. No entanto, a largura de banda recebida pelo dispositivo ONU-eNB pode mudar dependendo da carga das outras ONUs na rede EPON. É possível que o dispositivo ONU-eNB receba menos largura de banda do que a necessária para prover os requisitos de QoS dos fluxos transportados pelos *bearers*. Tal variabilidade pode ser compensada por um escalonador LTE *uplink* localizado no dispositivo ONU-eNB de modo que a provisão de requisitos de QoS possa ser cumprida com a largura de banda disponibilizada pela EPON bem como se possa aumentar a utilização tanto dos recursos rádio quanto do *backhaul*.

## 4.3 *Framework* para provisão de QoS na rede integrada

Esta seção propõe um *framework* para provisão de QoS para uma rede integrada LTE-EPON. Este *framework* permite garantir requisitos de QoS aos usuários móveis, mesmo quando a largura de banda disponibilizada para o dispositivo ONU-eNB não é suficiente para proporcionar a QoS requerida pelos usuários móveis. Para isto, o *framework* introduz uma arquitetura funcional para dispositivo integrado LTE-EPON, um esquema de mapeamento de QoS e um método para modificar escalonadores LTE existentes, a fim de ajustar o nível de prioridade dos *bearers* de acordo com o estado do enlace *backhaul*. Como não há necessidade de modificar o protocolo de sinalização MPCP para acomodar o dispositivo ONU-eNB, a implementação deste *framework* é facilitada, pois o dispositivo integrado solicita largura de banda para o OLT como qualquer outra ONU nas EPONs já existentes.

### 4.3.1 Arquitetura funcional do dispositivo ONU-eNB

A figura 4.1 ilustra o dispositivo integrado ONU-eNB proposto no presente trabalho, que se constitui de três componentes funcionais: o módulo ONU-EPON, o módulo eNB-LTE e o módulo Controle Comum ONU-eNB. Os módulos ONU-EPON e eNB-LTE provêm, respectivamente, as funcionalidades de uma ONU e um eNB. Uma interface entre estes dois módulos, o módulo Controle Comum ONU-eNB, é usada para a comunicação e controle do dispositivo integrado. Este módulo permite o compartilhamento de informações sobre as funções RRM do módulo eNB-LTE e as funções de escalonamento e alocação de recursos do módulo ONU-EPON. Além disso, o módulo Controle Comum ONU-eNB executa o mapeamento de QoS entre as redes LTE e EPONs.

Quando um pacote *uplink* chega no eNB, o mesmo é reconstruído e marcado com um valor *diffserv code point* (DSCP) de acordo com um mapeamento pré-definido que relaciona valores definidos de QCIs com valores DSCP. Esta marcação não é necessária quando o esquema conhecido como QoS refletiva [4] é empregado, pois o próprio UE marca o pacote *uplink*, baseado no campo DSCP dos pacotes *downlink* recebidos na comunicação. Em seguida, o pacote é encapsulado usando o protocolo de GTP-u para envio na direção do núcleo da rede móvel através da interface S1. Coloca-se, posteriormente, um cabeçalho UDP e um cabeçalho *internet protocol* (IP) para transmitir o pacote encapsulado através da rede de transporte. O valor do campo DSCP é copiado do cabeçalho IP do pacote interior (pacote original) para o cabeçalho do pacote exterior (pacote do túnel) para provisão de QoS na rede de *backhaul*. Após a chegada do pacote na ONU, a classificação de pacotes é realizada e o pacote se junta à fila da ONU correspondente ao seu valor de DSCP, realizando um processo de mapeamento entre DSCP e classe de serviço (CoS). Cada fila na ONU segue a política de escalonamento *first in-first out* (FIFO). Quando uma mensagem *gate* é recebida pela ONU, o escalonador intra-ONU determina quais filas da ONU serão servidas e a quantidade de dados que cada fila poderá transmitir baseado no tamanho do *grant* recebido na mensagem *gate*.

### 4.3.2 Esquema de mapeamento de QoS

A fim de garantir a provisão de QoS independentemente dos escalonadores intra-ONU e inter-ONU, propõe-se um esquema de mapeamento *all-to-one*, no qual, todos os pacotes provenientes do módulo eNB-LTE são mapeados para uma única fila FIFO no módulo ONU-EPON. O mapeamento de todos os DSCPs para uma única CoS significa que não são impostas restrições de provisão de QoS no módulo ONU-EPON do dispositivo integrado na rede EPON. Isto permite a rápida implementação da proposta em redes de acesso ópticas baseadas em EPON, tanto em implementações atuais como futuras, uma vez que não são necessárias alterações na infraestrutura dos sistemas FTTx.

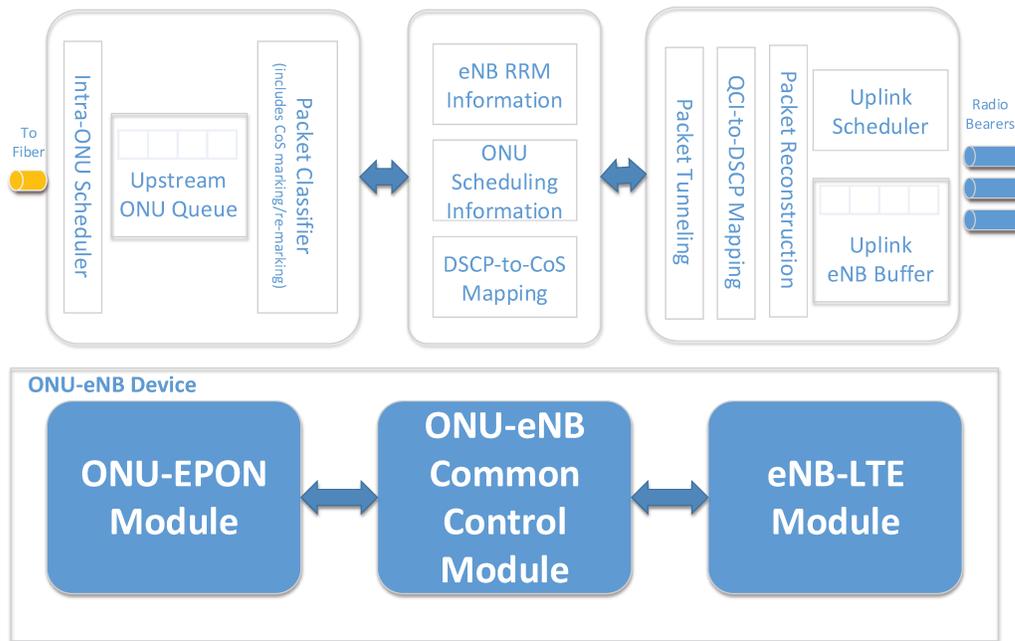


Figura 4.1: Arquitetura funcional do dispositivo integrado ONU-eNB.

Ao se atribuir a provisão de QoS para o módulo eNB-LTE, a rede integrada proposta pode capitalizar nas EPONs já implantadas, que não levam em consideração a provisão de QoS em cenários FTTCcell, pois um algoritmo tradicional como o IPACT e um escalonamento intra-ONU simples baseado em FIFO são suficientes para prover QoS aos usuários móveis e para melhorar a utilização da rede.

Outra vantagem desta proposta é que um mapeamento pré-configurado *DSCP-to-CoS* pode substituir a classificação de pacotes para todos os pacotes provenientes do módulo eNB-LTE, evitando assim o *overhead* de classificação. Além disso, este esquema de mapeamento permite que escalonadores LTE *uplink* possam levar em consideração o estado de carga do enlace *backhaul* durante o escalonamento de solicitações dos usuários móveis. Assim, o tamanho da fila *upstream* do dispositivo ONU-eNB pode ser controlado pelo módulo eNB-LTE, considerando a capacidade disponível no enlace *backhaul*. A próxima seção apresenta uma maneira simples para a modificação dos atuais escalonadores LTE *uplink* para provisão de QoS, de forma a que possam lidar com a variabilidade na largura de banda disponível no enlace *backhaul*.

### 4.3.3 Método para consideração do estado do enlace de *backhaul*

O esquema de mapeamento de QoS proposto exige uma priorização dinâmica de *bearers* que considere a carga no enlace *backhaul*. No entanto, os escalonadores atuais não levam em conta informações sobre o estado do enlace *backhaul* durante o escalonamento de oportunidades de transmissão dos usuários móveis. Nesta seção, introduz-se um procedimento simples para modificar escalonadores LTE para provisão de QoS, de modo a se poder considerar a carga do enlace *backhaul*.

O método proposto baseia-se na ideia de detectar quando o ONU-eNB está recebendo menos banda do que a necessária para suportar o tráfego que tem nos seus *buffers* dentro de uma janela de medição. Esta janela é definida pela periodicidade com a qual o fator  $C(t)$  é atualizado. Quando o enlace *backhaul* não está congestionado, o escalonador LTE pode priorizar normalmente os usuários, aproveitando assim os recursos da interface rádio e do *backhaul* de forma ótima. Quando um "déficit" de largura de banda for detectado, o escalonador deve reduzir a quantidade de tráfego nGBR que é escalonado. Com isto, o tamanho do *buffer* do dispositivo integrado ONU-eNB é controlado, evitando que desperdícios de largura de banda na interface aérea bem como no *backhaul* aconteçam. Caso muito tráfego nGBR chegue no *buffer* do ONU-eNB durante o congestionamento do enlace *backhaul*, o atraso dos pacotes no *buffer* vai aumentar (efeito indesejável na rede). O *buffer* pode, inclusive, ultrapassar sua capacidade, desperdiçando assim os recursos rádio utilizados para transportar os pacotes descartados. Para tal efeito, propõe-se o fator de compensação do "déficit" de largura de banda para o tempo  $t$ , definido como:

$$C(t) = \begin{cases} \frac{gates(t)}{reports(t)}, & \text{se } reports(t) > 0 \\ C(t - T_{up}), & \text{se } reports(t) = 0 \text{ e } m = l \\ 1, & \text{se } reports(t) = 0 \text{ e } m \neq l \end{cases} \quad (4.1)$$

onde,  $gates(t)$  é o somatório dos  $m$  *grants* recebidos durante a janela de atualização do fator  $C(t)$ , denotada por  $T_{up}$ , isto é, a quantidade de bytes atribuído para um determinado dispositivo ONU-eNB pelo OLT, desde a atualização anterior até o tempo atual de atualização  $t$ , ou seja, no intervalos  $(t - T_{up}, t]$ ;  $reports(t)$  é a quantidade de bytes efetivamente solicitados pelo dispositivo ONU-eNB para o OLT através de  $l$  mensagens *report*, que geraram a chegada de  $l$  *grants* no intervalo  $(t - T_{up}, t]$ .

$reports(t)$  é igual a 0 no intervalo de medição  $(t - T_{up}, t]$  por três motivos: (i) porque não chegou nenhuma mensagem *gate* no intervalo  $(t - T_{up}, t]$ , nesse caso  $m$  e  $l$  são nulos; (ii) porque a ONU tinha seus *buffers upstream* vazios e gerou a chegada de mensagens *gates* com valor igual a 0 no intervalo  $(t - T_{up}, t]$  (todas as mensagens *report* foram com valor 0), nesse caso  $m$  é igual a  $l$  e diferente de 0 ou; (iii) porque uma ou várias mensagens *gate* que chegaram no intervalo  $(t - T_{up}, t]$  não foram geradas por uma mensagem *report*, nesse caso,  $m$  é diferente de  $l$ . Isto acontece por exemplo no *cold start* ou quando uma

ONU está sendo inserida na rede após ter sido desligada da energia (caso bastante comum em aplicações FTTH [42]).

$reports(t)$  é maior do que 0 no intervalo de medição  $(t - T_{up}, t]$  quando pelo menos uma mensagem  $gate$  foi recebida nesse intervalo com valor de  $grant$  maior do que 0. Para o caso em que somente uma mensagem  $gate$  foi recebida na janela de atualização  $T_{up}$ ,  $C(t)$  fica reduzido a:

$$C(t) = \frac{gate(k)}{report(k-1)} \quad (4.2)$$

onde  $gate(k)$  é o número de bytes atribuído a um dispositivo ONU-eNB pelo OLT para o  $k$ -ésimo ciclo EPON (último ciclo EPON no tempo  $t$ ) e  $report(k-1)$  é o número de bytes solicitado pelo ONU-eNB no  $(k-1)$ -ésimo ciclo EPON. Para o caso em que  $n$  mensagens  $gate$  foram recebidas na janela de atualização  $T_{up}$ ,  $n > 1$ ,  $gates(t)$  é calculado como:

$$gates(t) = \sum_{i=0}^{n-1} gate(k-i) \quad (4.3)$$

e  $reports(t)$  é calculado como:

$$reports(t) = report(k-1) + \sum_{i=1}^{n-1} gate(k-i). \quad (4.4)$$

Note-se que, quando  $C(t)$  é igual a 1, o enlace *backhaul* não está congestionado, e o escalonador LTE deve funcionar normalmente. Quando  $C(t)$  é inferior a 1, o enlace *backhaul* EPON encontra-se temporariamente congestionado, isto é, há uma "déficit" de largura de banda e, portanto, o escalonador deve ser modificado para reduzir a quantidade de tráfego de baixa prioridade escalonado, enquanto a carga do enlace *backhaul* é alta.

O valor de atualização de  $C(t)$ ,  $T_{up}$ , deve ser cuidadosamente definido, pois valores muito baixos, ou muito altos podem afetar a estabilidade da rede. No caso de valores muito baixos, na ordem de milissegundos, o fator  $C(t)$  pode indicar, inadequadamente, que existe congestionamento, quando realmente o valor de  $T_{MAX}$  é pequeno e o enlace *backhaul* não está congestionado. Assim, valores muito baixos afetam o desempenho de redes com  $T_{MAX}$  pequenos (*e.g.*, 1 ms, 2 ms). Um limiar inferior para o valor de atualização de  $T_{up}$  é 4 ms, dado que escalonamentos feitos pelo eNB no TTI  $n$  somente estarão disponíveis no eNB 4 ms mais tarde, ou seja, no intervalo  $n + 4$ , e como o valor de  $C(t)$  deve considerar as informações mais atualizadas do comportamento da rede, o valor de  $T_{up}$  deve estar acima deste limite.

No caso de valores altos, da ordem de dezenas de milissegundos, o valor de  $C(t)$  pode refletir efetivamente situações nas quais o enlace *backhaul* encontra-se congestionado por longos períodos. No entanto, o comportamento do escalonador não consegue acompanhar

o real estado da rede, o que pode impactar negativamente o desempenho da rede. Por isto, o valor de atualização será analisado conjuntamente com a avaliação de desempenho, usando valores de  $T_{up}$  de 5 ms e 10 ms.

## 4.4 Estudo de caso

Nesta seção, introduze-se modificações no escalonador ZBQoS de modo a que este possa lidar com a variabilidade da capacidade de um enlace de *backhaul* EPON, utilizando o método introduzido na seção anterior. Como foi descrito na Seção 3.2, o escalonador ZBQoS define uma métrica de escalonamento que emprega uma função em forma de  $z$  para lidar com a priorização dinâmica dos *bearers* nGBR, maximizando, assim, a vazão total da célula, enquanto garante requisitos de QoS. O fator de compensação  $C(t)$  foi introduzido no escalonador ZBQoS para que pudesse lidar com a variabilidade na largura de banda disponível no *backhaul*, especialmente quando o enlace de *backhaul* estiver saturado.

A figura 4.2a mostra os valores das métricas de escalonamento relacionadas com atraso do escalonador ZBQoS para aos *bearers* GBR e nGBR em função da razão  $x$ . Como descrito no Capítulo 3, quanto maior o valor da métrica, menor é a prioridade da requisição. A aplicação do método proposto para a modificação de escalonadores LTE leva à alteração do valor da métrica para *bearers* nGBR, de modo que quando o enlace de *backhaul* estiver saturado, isto é, o valor de  $C(t)$  for inferior a 1, o valor de prioridade dos *bearers* nGBR diminua proporcionalmente com o valor de  $C(t)$ . Para isto, a métrica de escalonamento para *bearers* nGBR, introduzida na equação (3.4), é redefinida como segue:

$$D_{u_i}^{nGBR}(n) = 2 - x + C_j(t) \cdot (f_z(x; 0, 7, 0, 85) - f_z(x; 0, 85, 1)) \quad (4.5)$$

onde  $f_z(\cdot)$  e  $x$  são definidos na equação (3.2) e (3.3), respectivamente. Já  $C_j(t)$  é o fator de compensação dado pela equação (4.1) para o  $j$ -ésimo dispositivo integrado ONU-eNB (onde está sendo executado o algoritmo de escalonamento).

Quando comparada esta nova métrica para *bearers* nGBR (figura 4.2b) com a métrica do escalonador ZBQoS (figura 4.2a), percebe-se que a inclinação do valor da nova métrica de escalonamento dos *bearers* nGBR é reduzida proporcionalmente e dinamicamente com o valor de  $C(t)$ , isto é, a prioridade dos *bearers* nGBR diminui com o aumento da carga de tráfego no enlace *backhaul*, seguindo, assim, o método proposto para modificar escalonadores LTE.

O escalonador modificado, utilizando a nova métrica de escalonamento para usuários nGBR (dada pela equação (4.5)), é chamado de *hybrid z-based QoS scheduler* (HZBQoS).

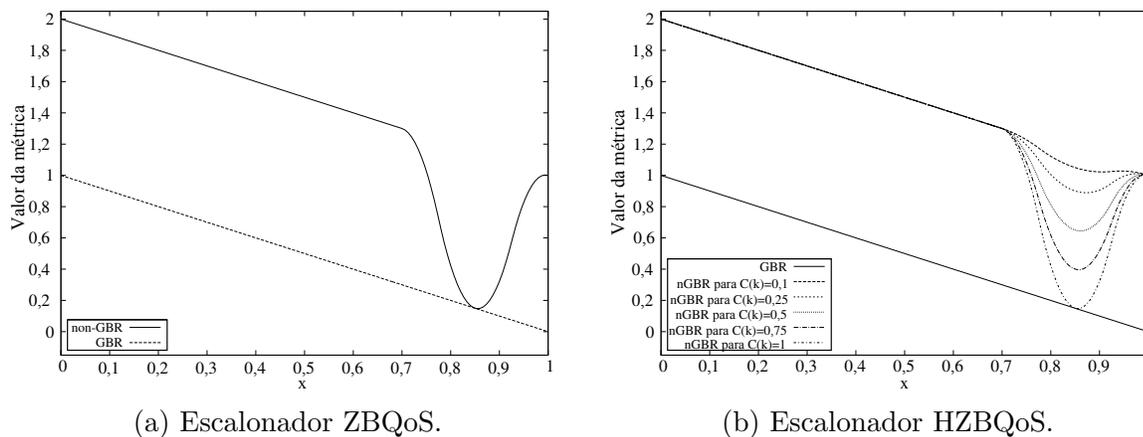


Figura 4.2: Valor da métrica de escalonamento para *bearers* GBR e nGBR em função da razão  $x$ .

## 4.5 Avaliação de desempenho

Para avaliar a proposta apresentada neste capítulo, um simulador para redes integradas LTE-EPON foi desenvolvido. O módulo eNB-LTE foi implementado no mesmo simulador usado na avaliação do desempenho do escalonador ZBQoS, o simulador LTE-Sim, versão 4.0 [52]. Além das mudanças feitas para as simulações do escalonador ZBQoS, outras funcionalidades necessárias para simular o funcionamento do dispositivo integrado ONU-eNB foram incorporadas. Incluem-se a implementação do novo escalonador HZBQoS e as funções requeridas para simular o módulo Controle Comum ONU-eNB, que obtém informações das funções RRM da rede LTE. As outras funções do módulo Controle Comum ONU-eNB também foram implementadas, tais como armazenamento das informações de escalonamento da rede EPON e o mapeamento de QoS entre redes LTE e EPON.

O módulo ONU-EPON foi construído em Java, baseado no simulador EPON-Sim [24], que foi desenvolvido no *laboratório de redes de computadores* (LRC) e que implementa o algoritmo DBA IPACT [41]. Todas as políticas de escalonamento introduzidas por Kramer *et al.* [41] foram acrescentadas ao simulador EPON-Sim. O tráfego das ONUs residenciais foi simulado usando agregação de fontes Pareto ON-OFF, com tempos entre chegadas exponencialmente distribuídos e tamanho de pacotes entre 64 bytes e 1.518 bytes [43].

A fim de simular uma rede EPON atuando como *backhaul* da rede LTE, foi desenvolvida uma interface entre os módulos LTE e EPON, que inclui os protocolos GTP-u, UDP e IP. Estes protocolos são responsáveis pela comunicação sobre a interface S1 entre o dispositivo integrado ONU-eNB e o OLT. Essa inclusão é bastante importante, pois a interface S1 gera um incremento de aproximadamente 10% no tráfego enviado através do *backhaul*

das redes LTE em comparação com o tráfego da interface aérea [57]. Este incremento é devido ao *overhead* dos cabeçalhos utilizados para fazer o tunelamento dos dados da eNB para o núcleo da rede móvel (cabeçalhos GTP + UDP + IP).

Semelhantemente à avaliação do desempenho do capítulo anterior, todos os gráficos apresentados nesta seção mostram valores médios, com intervalos com nível de confiança de 95 %, derivado usando o método de replicação independente. A duração de cada execução também foi de 100s. As métricas de PLR, atraso total (*backhaul* + acesso), atraso no *backhaul* e vazão média agregada por tipo de tráfego foram usadas para comparação. Todas estas métricas são apresentados em função do número de usuários na célula.

### 4.5.1 Cenário de simulação

Os cenários simulados utilizaram uma rede EPON com topologia em árvore e capacidade do canal óptico de 1 Gb/s (excluindo o *overhead* da camada física). Esta rede foi composta por 1 OLT servindo 32 ONUs, das quais 31 são ONUs residenciais e 1 é ONU-eNB. O OLT utiliza o protocolo IPACT com a política de escalonamento *limited* [41] funcionando no modo *online*.

A parte correspondente à rede LTE é composta de uma única célula, servida pelo dispositivo integrado ONU-eNB, e número de usuários móveis variando de 10 UEs a 180 UEs, com incrementos de 10 UEs. Os demais parâmetros e suposições feitas na Seção 3.4 para a avaliação do desempenho do escalonador ZBQoS são mantidas nas simulações neste capítulo. A tabela 4.1 mostra os modelos de tráfego dos usuários móveis, utilizados para as simulações conjuntamente com seus requisitos de QoS e a tabela 4.2 resume os principais parâmetros de configuração utilizados na simulação.

O objetivo destes experimentos é avaliar a capacidade do *framework* proposto para suportar os requisitos de QoS dos usuários móveis e melhorar o desempenho em condições de carga de tráfego variável tanto na rede LTE como na rede EPON. Para tal, o desempenho do escalonador modificado HZBQoS, usando o *framework* proposto, foi comparado com o desempenho do escalonador sem modificações (ZBQoS). A fim de fazer uma comparação justa, o mesmo escalonador no domínio da frequência utilizado na avaliação de desempenho do escalonador ZBQoS foi empregado. Estes experimentos visam também definir o período de atualização para o fator  $C_j(t)$ .

A fim de se avaliar o desempenho dos escalonadores sob variações na capacidade do *backhaul* e de carga na rede móvel, duas cargas distintas no *backhaul*, 0,6 e 0,95 da capacidade máxima da rede EPON foram empregadas, o que corresponde a cenários com uma rede de cargas baixas e altas, respectivamente. O tráfego injetado pelas ONUs residenciais é de 19 Mb/s nos cenários com baixa carga e de 30 Mb/s nos cenários com alta carga.

Tabela 4.1: Modelo de tráfego e requisitos de QoS dos usuários móveis da rede integrada LTE-EPON.

Serviço	VoIP	Vídeo	CBR
Descrição	G.729 modelo ON/OFF	H.264 <i>trace-based</i> <sup>a</sup>	1000 bytes a cada 8 ms
Taxa de bit	8,4 kbps	242 kbps	1 Mbps
QCI	1	2	8
PDB	100 ms	150 ms	300 ms
GBR	8,4 kbps	242 kbps	N/A
Proporção	2 (40%)	2 (40%)	1 (20%)

<sup>a</sup> Utilizou-se o *trace* do vídeo Foreman, disponível no simulador LTE-Sim [52].

A análise do período de atualização de  $C_j(t)$  foi realizado da seguinte forma. Considerou-se valores para  $T_{max}$  de 5 ms e 10 ms. Para  $T_{max} = 5$  ms,  $C_j(t)$  foi atualizado a cada 5 ms e 10 ms, enquanto para  $T_{max} = 10$  ms, o período de atualização foi a cada 10 ms. Assim, para  $T_{max} = 5$  ms,  $C_j(t)$  é calculado com no mínimo 1 mensagem *gate* com  $T_{up} = 5$  ms e 2 mensagens *gate* com  $T_{up} = 10$  ms sob condições de altas cargas na rede *backhaul*. Para  $T_{max} = 10$  ms,  $C_j(t)$  é calculado com no mínimo 1 mensagem *gate* sob condições de altas cargas na rede *backhaul*.

#### 4.5.2 Resultados de simulação

A figura 4.3 mostra a PLR para o tráfego de vídeo. O escalonador HZBQoS é capaz de fornecer valores baixos de PLR para o tráfego de vídeo sob todas as cargas tanto no *backhaul* como na rede LTE, o que não acontece com o serviço fornecido pelo escalonador ZBQoS, pois a PLR produzida por esse escalonador ultrapassa 1% com 150 UEs, e continua aumentando com a carga de tráfego na rede móvel, chegando até 5%. Como mencionado no capítulo anterior, 1% é o valor máximo aceitável para o tráfego de vídeo [38]. Além disto, como aconteceu na avaliação de desempenho do capítulo anterior, ambos os escalonadores fornecem um serviço sem perda de pacotes para o tráfego de VoIP (figuras não mostradas), como consequência da sua alta prioridade no escalonamento.

A figura 4.4 mostra a vazão agregada do tráfego CBR. Este gráfico ilustra como ambos os escalonadores diminuem a quantidade de tráfego CBR servido para conseguir manter os requisitos de QoS do tráfego de tempo real em cenários com alta carga de tráfego na rede móvel, o que indica que o escalonador HZBQoS mantém essa propriedade, própria

Tabela 4.2: Parâmetros de simulação para a rede integrada LTE-EPON.

Parâmetro	Valor
Número de usuários na célula	10-180
Largura de banda do sistema	15 MHz
Número de blocos de recursos	75
Escalonador <i>uplink</i>	TD: ZBQoS FD: PF-FME TD: HZBQoS FD: PF-FME
Número max. de UEs passados para o FDPS	15
Número max. de UEs escalonáveis por TTI	15
Número de ONUs residenciais	31
Número de dispositivos ONU-eNB	1
Velocidade da linha óptica	1 Gb/s
Carga das ONUs	19 Mb/s e 30 Mb/s
Atraso de propagação na fibra	5 $\mu$ s/km
Distancia entre OLT e ONU-eNBs	[10,20] km
RTT das ONUs/ONU-eNBs	[100,200] $\mu$ s
Tamanho do <i>buffer</i> das ONUs/ONU-eNBs	10 MB
Duração máximo do ciclo EPON	5 ms e 10 ms
Período de atualização de $C(k)$	5 ms <sup>a</sup> e 10 ms <sup>b</sup>
Escalonador intra-ONU	IPACT (política <i>limited</i> )
Banda de guarda	1 $\mu$ s

<sup>a</sup> Somente para  $T_{max}$  igual a 5 ms

<sup>b</sup> Para  $T_{max}$  igual a 5 ms e 10 ms

de escalonadores com provisão de QoS e já observada no escalonador ZBQoS. No entanto, o ponto de saturação do escalonador ZBQoS ocorre com apenas 90 UEs, enquanto com o escalonador HZBQoS ocorre com 100 UEs para  $T_{max}$  e  $T_{up}$  de 5 ms. Para o restante dos cenários simulados, a saturação ocorre com 120 UEs. Este fato mostra a falta de capacidade do escalonador ZBQoS para lidar com a variabilidade da capacidade do enlace de *backhaul*, uma vez que subutiliza os recursos disponíveis tanto no *backhaul* como na rede móvel. Pode-se observar, também, o efeito do uso de um valor pequeno para  $T_{up}$  (5 ms) em cenários com *backhaul* de altas cargas no desempenho do escalonador HZBQoS. Tal valor leva a uma menor utilização do recursos da rede bem como gera instabilidade

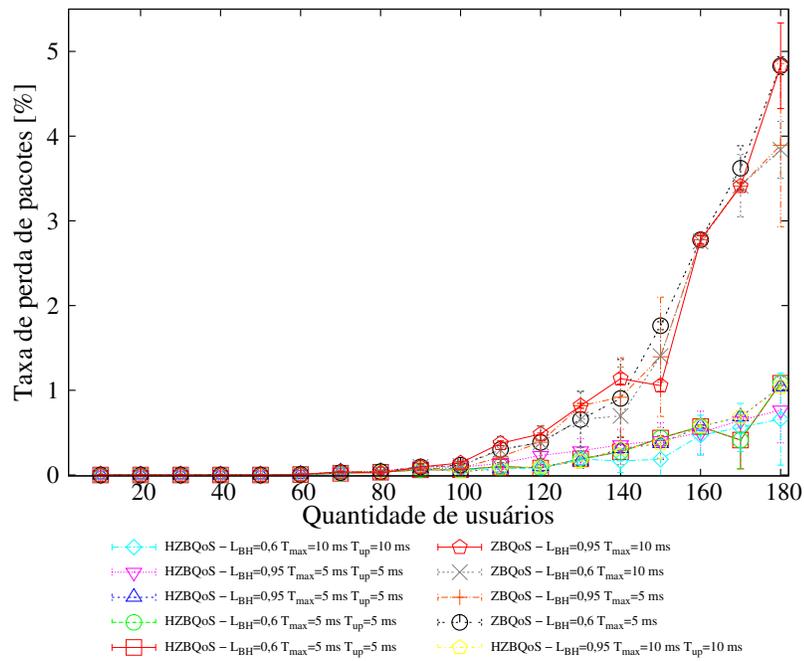


Figura 4.3: Taxa de perda de pacotes para tráfego de vídeo.

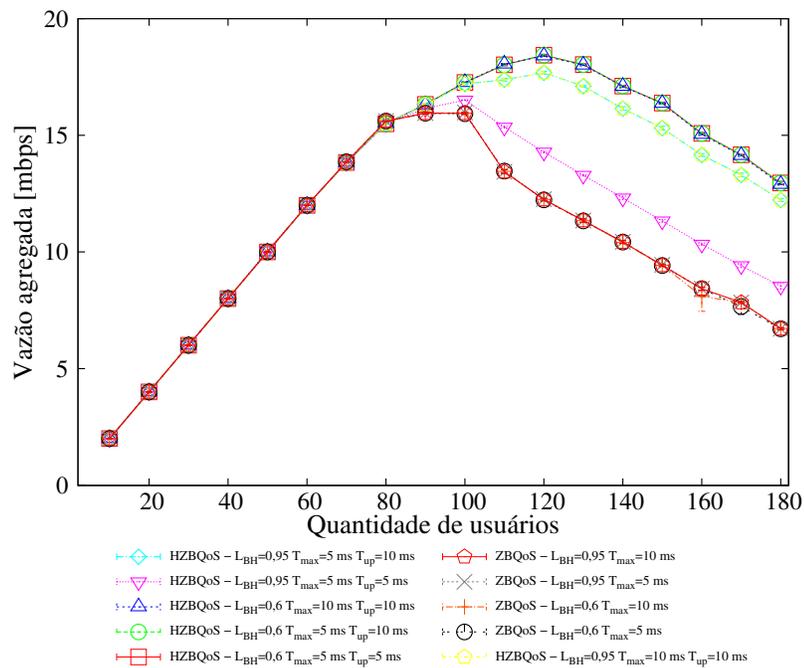


Figura 4.4: Vazão agregada para tráfego CBR.

na fila do dispositivo ONU-eNB como consequência da chegada de tráfego nGBR durante congestionamento do *backhaul*, o que leva ao aumento do atraso para todos os usuários da rede (figuras 4.5, 4.6, 4.7). A diferença observada entre a vazão atingida pelo escalonador HZBQoS em cenários com altas e baixas cargas deve-se à limitação na capacidade do enlace de *backhaul*. Observa-se, também, que em cenários com baixas cargas, o valor de  $T_{up}$  não impacta o desempenho, pois  $T_{up}$  tem um papel importante para lidar com a limitação de capacidade no *backhaul*. Em termos gerais, o escalonador HZBQoS oferece vazão agregada para o tráfego CBR até 40% maior do que a vazão dada pelo escalonador ZBQoS. Isto leva a que o escalonador HZBQoS obtenha uma melhor utilização da rede em cenários com altas cargas tanto no *backhaul* como na rede móvel, aproveitando, assim, melhor os recursos disponíveis nas duas redes.

Quando as figuras 4.3 e 4.4 são vistas em conjunto, os benefícios que traz o *framework* proposto ficam ainda mais evidente, pois o ganho na vazão agregada da rede apresentado pelo escalonador HZBQoS é obtido enquanto gera valores de PLR abaixo de 1% sob alta carga na rede móvel. Desempenho este oposto ao do escalonador ZBQoS, que apresenta altas perdas de pacotes e uma vazão agregada até 40% menor sob altas cargas na rede móvel.

As figuras 4.5, 4.6, 4.7 mostram o atraso médio para o tráfego de vídeo, VoIP e CBR, respectivamente. Como esperado, o atraso é ligeiramente maior, quando o *backhaul* está

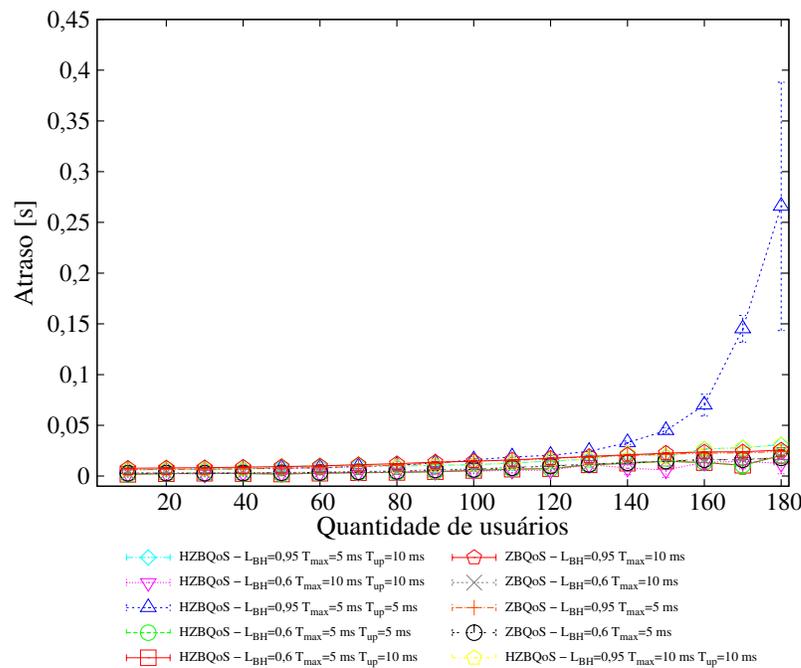


Figura 4.5: Atraso médio de pacotes para o tráfego de vídeo.

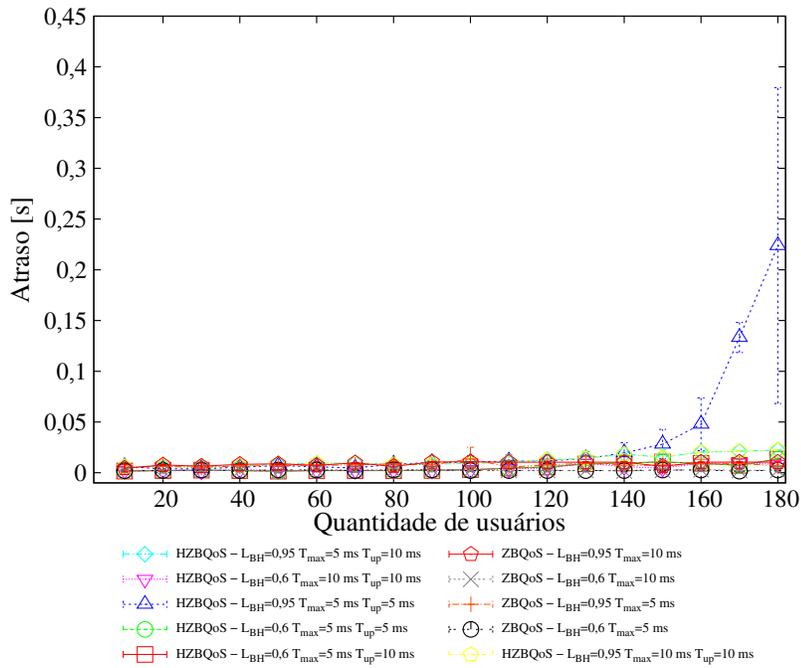


Figura 4.6: Atraso médio de pacotes para o tráfego de VoIP.

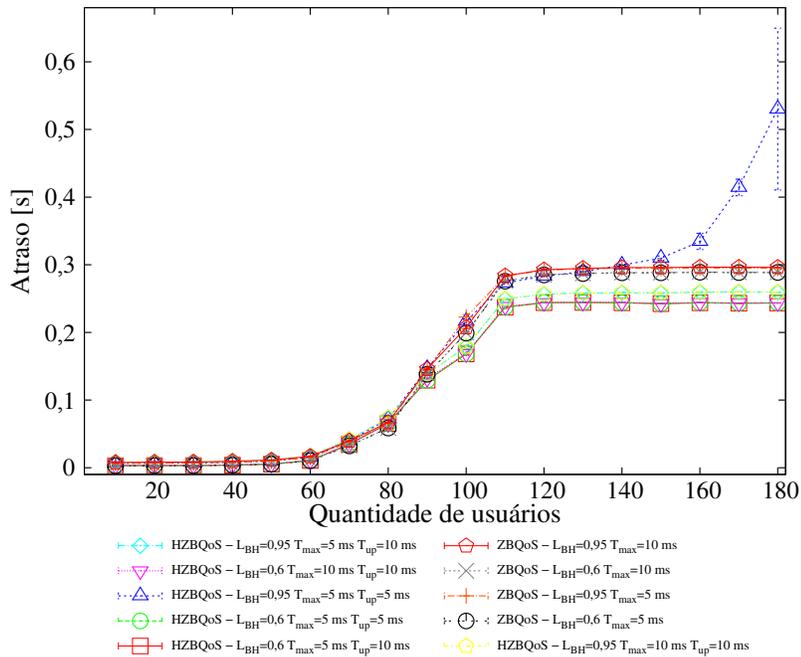


Figura 4.7: Atraso médio de pacotes para o tráfego CBR.

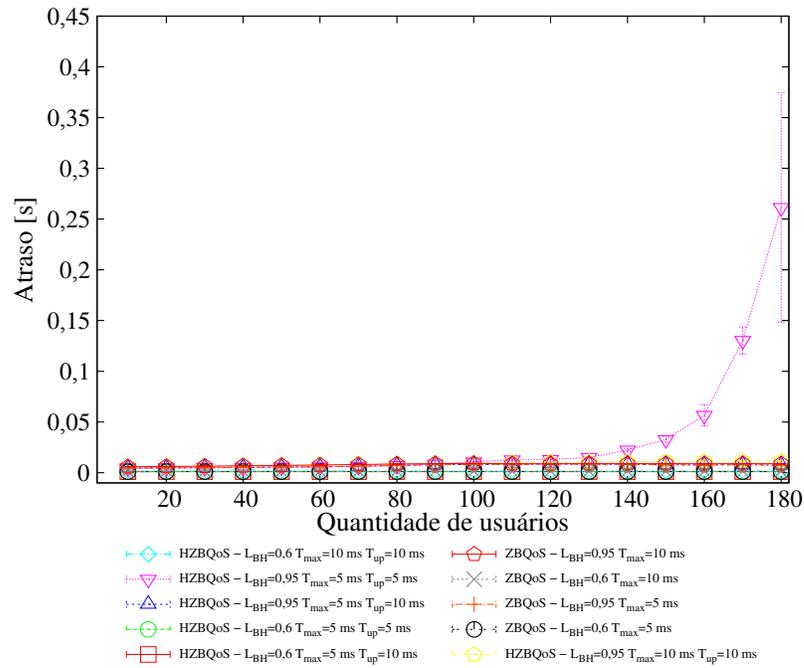


Figura 4.8: Atraso médio de pacotes no *backhaul* para o tráfego de vídeo.

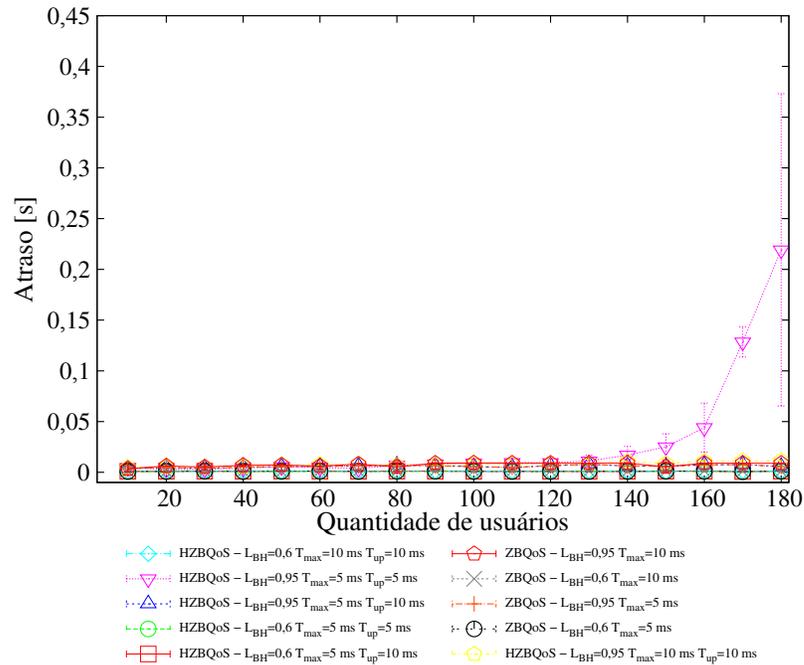


Figura 4.9: Atraso médio de pacotes para no *backhaul* o tráfego VoIP.

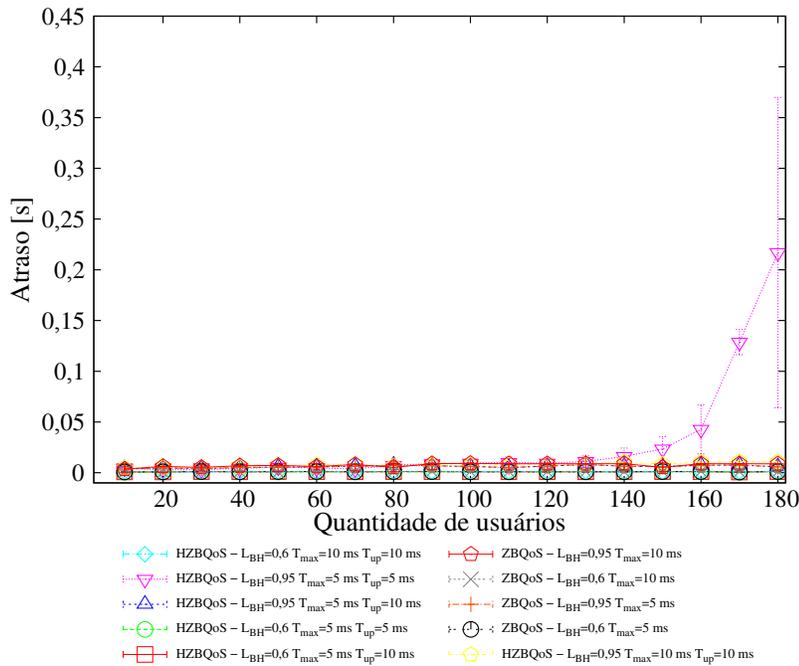


Figura 4.10: Atraso médio de pacotes no *backhaul* para o tráfego CBR.

gestionado (carga de 95%). Observa-se, também, que os valores de atraso estão dentro dos valores definidos para cada classe, com exceção do escalonador HZBQoS em cenários com altas cargas no *backhaul* e alta carga na rede móvel,  $T_{max}$  e  $T_{up}$  igual a 5 ms. Para esse caso, o atraso produzido pelo escalonador HZBQoS aumenta de forma acentuada a partir de 130 UEs, como consequência do curto período para se atualizar o fator  $C_j(k)$  utilizado para coletar informações do estado da rede de *backhaul*. Nestes cenários, somente uma mensagem *gate* é recebida, não conseguindo representar de forma precisa o estado da rede *backhaul*, o que gera instabilidade na fila do dispositivo ONU-eNB. Pode-se observar que em um cenário semelhante com valor  $T_{max}$  igual a 10 ms, o problema de instabilidade não existe.

Para corroborar que o comportamento observado é devido a instabilidade no *buffer* do dispositivo ONU-eNB, mostra-se o atraso no *backhaul* para os diferentes tipos de tráfego (figuras 4.8, 4.9, 4.10), isto é, o atraso compreendido entre a chegada do pacote no *buffer* do dispositivo ONU-eNB até a saída do *buffer* tendo com destino a OLT. O atraso no *backhaul* é muito similar ao atraso total para o tráfego de VoIP e vídeo, particularmente para o caso do escalonador HZBQoS com valor  $T_{max}$  e  $T_{up}$  de 5 ms, altas cargas na rede *backhaul* e grande quantidade de usuários móveis, o que indica que o atraso de escalonamento na LTE é mínimo e que o *backhaul* é o que mais contribui para o atraso observado. Além disto, o atraso na rede *backhaul* para os três tipos de tráfego tem um comportamento

similar, como conseqüência da adoção de uma fila única para transmissão *upstream*.

Conclui-se que o período de atualização do fator  $C_j(k)$  tem um papel importante no desempenho da proposta e deve ser atualizado com periodicidade de aproximadamente 10 ms, para se obter resultados satisfatórios e não gerar instabilidade na rede, independentemente do valor de  $T_{max}$  da EPON.

## 4.6 Resumo conclusivo

Este capítulo introduziu um *framework* para provisão de QoS para redes integradas LTE-EPON, que é totalmente compatível com os padrões das tecnologias LTE e EPON. O *framework* é composto por uma arquitetura funcional para o dispositivo integrado LTE-EPON, um esquema de mapeamento de QoS e um método para que escalonadores LTE existentes possam ser modificados, de forma a lidar com a variabilidade na capacidade do *backhaul* fornecido pelas EPONs. Apresentou-se, também, um estudo de caso, no qual se aplica o método proposto no escalonador ZBQoS. O escalonador HZBQoS é o resultado da aplicação deste método e ele considera as informações da rede móvel bem como leva em consideração o estado do enlace de *backhaul* para escalonar as requisições dos usuários móveis. Resultados de simulação mostram que o escalonador modificado (HZBQoS) conjuntamente com o *framework* proposto, melhoram a vazão agregada do tráfego CBR até 40%, quando comparado com a vazão dada pelo escalonador que não leva em consideração o estado do enlace do *backhaul* (escalonador ZBQoS), em cenários com altas cargas na rede móvel. Além disto, o escalonador não modificado produz sob condições de altas cargas, valores de PLR para tráfego de vídeo que ultrapassa amplamente 1%, valor máximo aceitável para este tráfego.

O escalonador HZBQoS representa uma nova classe de escalonadores LTE, introduzida nesta dissertação. Essa nova classe de escalonadores LTE são chamados *backhaul-aware schedulers* ou *hybrid schedulers*, pois levam em consideração não só informações da rede sem fio, mas também do enlace de *backhaul* (no caso do escalonador HZBQoS é um *backhaul* óptico), a fim de melhorar o desempenho de escalonamento na estação rádio base, quando o enlace de *backhaul* possui uma variabilidade na sua capacidade ou quando se encontra congestionado devido a um pico na carga da rede móvel.



# Capítulo 5

## Conclusões

### 5.1 Considerações finais

Frente ao constante crescimento do tráfego no *backhaul* da rede móvel, a suposição de enlaces de *backhaul* com capacidade sempre superior ao requisito de largura de banda para atender o tráfego do eNB não pode mais ser sustentada em redes móveis 4G, surgindo, assim, a necessidade por novos mecanismos que lidem com a variabilidade na banda passante disponível no enlace de *backhaul* e que efetivamente possam garantir QoS aos usuários móveis que a requeiram. A fim de endereçar essa questão, esta dissertação estudou o problema de provisão de QoS em redes LTE integradas com redes EPON, nas quais a rede óptica atua como *backhaul* da rede móvel.

Foi introduzido um escalonador de tráfego para redes LTE no sentido *uplink*. Este escalonador faz priorização dinâmica de usuários baseado em uma política de escalonamento que leva em consideração requisitos tanto de atraso como de taxa de transmissão. Os experimentos mostraram que o escalonador proposto melhora significativamente a vazão total da célula e garante requisitos de QoS às diferentes aplicações, inclusive em condições de alta carga da rede.

Entretanto, esse escalonador bem como os outros existentes na literatura não fazem nenhuma consideração sobre o enlace *backhaul* no momento da alocação dos recursos para transmissão dos usuários, o que pode potencialmente degradar a QoS fornecida aos usuários móveis em condições de congestionamento do enlace de *backhaul*. Isto também pode levar ao desperdício dos recursos disponíveis tanto na rede móvel como no *backhaul*. Devido a isto, foi proposto um *framework* para provisão de QoS em redes LTE com *backhaul* baseado em EPONs. Este *framework* contém a descrição funcional de um dispositivo integrado ONU-eNB, um esquema de mapeamento de QoS entre redes LTE e EPON e um método que foi desenvolvido para modificar escalonadores LTE existentes de tal forma que consigam lidar com a variabilidade na capacidade de enlaces de *backhaul* fornecido

pelas EPONs. Na avaliação, o *framework* mostrou ser bastante eficiente para garantir QoS quando a rede de *backhaul* está congestionada ou quando a rede móvel está sobrecarregada.

Além das vantagens de uma arquitetura de rede integrada LTE-EPON, tais como custo reduzido do equipamento integrado e o compartilhamento de informações entre as duas redes, a importância dos resultados do *framework* proposto recai na possibilidade de garantir QoS em redes integradas LTE-EPON sem a necessidade de sobre dimensionar o enlace de *backhaul* para esse propósito, o que tem um impacto direto na redução dos custos da rede de *backhaul* para os MNOs.

Dado que o estudo feito nesta dissertação foca no escalonador no domínio do tempo e no *framework* de QoS para redes integradas LTE-EPON, essas contribuições podem, também, ser aplicadas à tecnologia LTE-A. Por um lado, a quantidade de tráfego que cada eNB LTE-A gera pode ser facilmente transportado com a migração de redes EPON para redes 10G-EPON, que utilizam a mesma Optical Distribution Network, e o mesmo protocolo para solicitação de largura banda das redes EPON implementadas atualmente, conseguindo assim suportar a demanda de tráfego gerado pela tecnologia LTE-A nas estações base com a mesma infraestrutura de rede utilizada pela tecnologia EPON. Por outro lado, o escalonamento na tecnologia LTE-A muda somente em como é feito o escalonamento no domínio da frequência devido à tecnologia Carrier Aggregation, que permite aumentar em até cinco vezes a taxa de transmissão alcançada pela tecnologia LTE. Sendo assim, as contribuições feitas nesta dissertação, também podem ser aplicadas para a provisão de QoS em redes celulares 4G baseadas na tecnologia LTE-A, que devem ser implementadas entre 2014 e 2020, aproximadamente.

## 5.2 Sugestões para pesquisas futuras

Como trabalhos futuros, apresentam-se as seguintes sugestões:

- Aplicação do método proposto para levar em consideração o estado da rede de *backhaul* EPON além da provisão de QoS. Por exemplo, tentativa de redução do consumo de energia nos dispositivos móveis através da utilização de modulações mais robustas quando a rede de *backhaul* estiver congestionada, pois estas consomem menos energia e são mais apropriadas em caso de congestionamento no *backhaul* dado que reduzem a quantidade de tráfego que é enviado através dele. Além desta área, outras funções RRM, tais como controle de potência, controle de admissão e gerência de mobilidade também podem tirar proveito da informação do estado do *backhaul* para melhorar o desempenho da rede.
- A aplicação do esquema de provisão de QoS proposto em um cenário de fento-células, nas quais o eNB é uma estação rádio base com baixa potência de transmissão,

conhecida como HeNB em redes LTE. O HeNB é ligada à rede da operadora através de uma rede EPON fornecida pelo provedor de Internet residencial do usuário. Estas redes, geralmente, tem proporção de *overbooking* de 1:4 e pode atingir até 1:10 no pior dos casos, além de não terem SLAs rigorosos definidos com os usuários residenciais.

Esse cenário é bastante interessante pois além do tráfego da rede móvel trafegando pelo dispositivo integrado (chamado de ONU-HeNB), existe, também, tráfego Ethernet do usuário, que pode sofrer degradação de QoS. A aplicação dos resultados deste trabalho no cenário anterior pode ter um grande impacto nas métricas de desempenho analisadas no Capítulo 4. Levar em consideração o estado da rede de *backhaul* e empregar o mapeamento de QoS proposto pode implicar em melhoras significativas no desempenho da rede.

- A proposta de um mecanismo de escalonamento centralizado no OLT que leve em consideração que algumas requisições por largura de banda podem vir de dispositivos ONU-eNB de um mesmo MNO, com proposto em [7], porém para redes EPON. Neste cenário, um MNO pode ter um SLA assinado com o operador da rede de *backhaul* que tire proveito da diversidade de localidade e da variação não homogênea da carga das estações rádio base. Isto pode ser feito dando mais largura de banda em uma rodada para os dispositivos ONU-eNB que a requeiram, quando alguns dispositivos ONU-eNB que pertençam ao mesmo MNO não estejam usando a largura de banda mínima garantida pelo SLA para um ONU-eNB nessa rodada. A combinação deste mecanismo com o *framework* proposto, pode levar a melhoras significativas na provisão de QoS e à redução considerável dos custos do *backhaul*.



# Referências Bibliográficas

- [1] IEEE standard for information technology- telecommunications and information exchange between systems- local and metropolitan area networks- specific requirements part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications amendment: Media access control parameters, physical layers, and management parameters for subscriber access networks. *IEEE Std 802.3ah-2004*, pages 1–623, 2004.
- [2] IEEE standard for information technology - telecommunications and information exchange between systems - local and metropolitan area networks - specific requirements part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications amendment 1: Physical layer specifications and management parameters for 10 Gb/s passive optical networks. *IEEE Std 802.3av-2009 (Amendment to IEEE Std 802.3-2008)*, pages c1–214, 2009.
- [3] 3GPP. Policy and charging control architecture. TS 23.203, November 2011.
- [4] 3GPP. Universal mobile telecommunications system (UMTS); LTE; 3GPP system - fixed broadband access network interworking; stage 3. TS 24.139, October 2012.
- [5] A. Afifi, K.M.F. Elsayed, and A. Khattab. Interference-aware radio resource management framework for the 3GPP LTE uplink with QoS constraints. In *Computers and Communications (ISCC), 2013 IEEE Symposium on*, pages 000693–000698, July 2013.
- [6] Ian F. Akyildiz, David M. Gutierrez-Estevez, and Elias Chavarria Reyes. The evolution to 4G cellular systems: LTE-Advanced. *Phys. Commun.*, 3(4):217–244, dec 2010.
- [7] Pedro Alvarez, Nicola Marchetti, David Payne, and Marco Ruffini. Backhauling mobile systems with XG-PON using grouped assured bandwidth. In *Networks and Optical Communications - (NOC), 2014 19th European Conference on*, pages 91–96, June 2014.

- [8] M. Anas, C. Rosa, F.D. Calabrese, K.I. Pedersen, and P.E. Mogensen. Combined admission control and scheduling for QoS differentiation in LTE uplink. In *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th*, pages 1–5, 2008.
- [9] Carlos A. Astudillo, Juliana Freitag Borin, and Nelson L. S. da Fonseca. Impacto de critérios de projeto de escalonadores LTE uplink na qualidade de serviço. In *Anais do IV Workshop de Redes de Acesso em Banda Larga (WRA)*, May 2014.
- [10] Carlos A. Astudillo and Nelson L. S. da Fonseca. Standard-compliant QoS provisioning scheme for LTE/EPON integrated networks. *Wireless Communications, IEEE*, 21(3):44–51, June 2014.
- [11] Carlos A. Astudillo, Nelson L.S. da Fonseca, and Juliana Freitag Borin. LTE scheduler for LTE/TDM-EPON integrated networks. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2014 IEEE*, pages 1409–1414, April 2014.
- [12] Carlos A. Astudillo, Juliana Freitag Borin, and Nelson L.S. da Fonseca. LTE time-domain uplink scheduler for QoS provisioning. In *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2013 IEEE*, pages 1458–1463, December 2013.
- [13] N. Bhushan, Junyi Li, D. Malladi, R. Gilmore, D. Brenner, A. Damnjanovic, R. Sukhavasi, C. Patel, and S. Geirhofer. Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G. *Communications Magazine, IEEE*, 52(2):82–89, February 2014.
- [14] P. Blasco, M. Bennis, and M. Dohler. Backhaul-aware self-organizing operator-shared small cell networks. In *Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on*, pages 2801–2806, June 2013.
- [15] F. D. Calabrese, P. H. Michaelsen, C. Rosa, M. Anas, C.U. Castellanos, D.L. Villa, K.I. Pedersen, and P.E. Mogensen. Search-tree based uplink channel aware packet scheduling for UTRAN LTE. In *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE*, pages 1949–1953, 2008.
- [16] F. Capozzi, D. Laselva, F. Frederiksen, J. Wigard, I.Z. Kovacs, and P.E. Mogensen. UTRAN LTE downlink system performance under realistic control channel constraints. In *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall), 2009 IEEE 70th*, pages 1–5, 2009.
- [17] Rajesh Chundury. Mobile broadband backhaul: Addressing the challenge. *Ericsson Review*, 85(3):4–9, 2008.

- [18] J. Chung, J. Park, B. Choi, Y. Park, J. Yoo, and B.-W. Kim. Application of 2W-PON to the backhaul of a wireless network. *J. Optical Networking*, 7:905, October 2008.
- [19] M. Condoluci, M. Dohler, G. Araniti, A. Molinaro, and K. Zheng. Toward 5G densenets: architectural advances for effective machine-type communications over femtocells. *Communications Magazine, IEEE*, 53(1):134–141, January 2015.
- [20] Marilet De Andrade, Jiajia Chen, Björn Skubic, Jawwad Ahmed, and Lena Wosinska. Enhanced ipact: solving the over-granting problem in long-reach epon. *Telecommunication Systems*, 54(2):137–146, 2013.
- [21] Tiago P. C. de Andrade, Carlos A. Astudillo, and Nelson L. S. da Fonseca. The impact of massive machine type communication devices on the access probability of human-to-human users in LTE-based networks. In *IEEE Latin America Conference on Communications (Latincom)*, pages 1–6, November 2014.
- [22] Tiago P. C. de Andrade, Carlos A. Astudillo, and Nelson L. S. da Fonseca. Random access mechanism for RAN overload control in LTE/LTE-A networks. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–6, June 2015.
- [23] O. Delgado and B. Jaumard. Scheduling and resource allocation for multiclass services in LTE uplink systems. In *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2010 IEEE 6th International Conference on*, pages 355–360, 2010.
- [24] Mariana Piquet Dias. Provisão de qualidade de serviço em redes integradas epon-wimax. Mestrado, LRC, Instituto de Computação, UNICAMP, 2013.
- [25] F. Diehm, P. Marsch, G. Fettweis, and B. Ramamurthi. A low-complexity algorithm for uplink scheduling in cooperative cellular networks with a capacity-constrained backhaul infrastructure. In *Global Telecommunications Conference, 2009. GLOBECOM 2009. IEEE*, pages 1–6, Nov 2009.
- [26] Ericsson. Ericsson mobility report - on the pulse of the networked society. White Paper, November 2014.
- [27] M. A. Esmail and H. Fathallah. Physical layer monitoring techniques for TDM-passive optical networks: A survey. *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, 15(2):943–958, 2013.
- [28] Xiaohu Ge, Hui Cheng, M. Guizani, and Tao Han. 5G wireless backhaul networks: challenges and research advances. *Network, IEEE*, 28(6):6–11, Nov 2014.

- [29] N. Ghazisaidi, M. Maier, and C.M. Assi. Fiber-wireless (FiWi) access networks: A survey. *Communications Magazine, IEEE*, 47(2):160–167, 2009.
- [30] J. Ghimire and C. Rosenberg. Impact of limited backhaul capacity on user scheduling in heterogeneous networks. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2014 IEEE*, pages 2480–2485, April 2014.
- [31] GoMo News. FTTx & PON are good for mobile backhaul says Ovum. <http://www.gomonews.com/fttx-pon-are-good-for-mobile-backhaul-says-ovum>, May 2013 (accessed January 17, 2015).
- [32] J. Gozalvez. South Korea launches LTE-advanced [mobile radio]. *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, 9(1):10–27, March 2014.
- [33] E. Harstead. Future bandwidth demand favors TDM PON, not WDM PON. In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC) 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference*, pages 1–3, 2011.
- [34] Harri Holma and Antti Toskala. *LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced*. Wiley professional computing. Wiley, 2ed edition, April 2011.
- [35] IDATE. World FTTx markets. [http://www.idate.org/en/News/FTTx-World-Market\\_741.html](http://www.idate.org/en/News/FTTx-World-Market_741.html), June 2012 (accessed January 17, 2015).
- [36] Cisco Systems Inc. The zettabyte era: Trends and analysis. White Paper, June 2014.
- [37] Raj Jain. *The art of computer systems performance analysis - techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling*. Wiley professional computing. Wiley, 1991.
- [38] Toni Janevski. *Traffic Analysis and Design of Wireless IP Networks*. Artech House, Inc., Norwood, MA, USA, 2003.
- [39] P. Kela, J. Puttonen, N. Kolehmainen, T. Ristaniemi, T. Henttonen, and Martti Moisio. Dynamic packet scheduling performance in UTRA Long Term Evolution downlink. In *Wireless Pervasive Computing, 2008. ISWPC 2008. 3rd International Symposium on*, pages 308–313, 2008.
- [40] W. Kiess, Changsoon Choi, A. Khan, K. Kozu, and W. Kellerer. Protection scheme for passive optical networks shared between a fixed and a mobile operator. In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC) 2012 and the National Fiber Optic Engineers Conference*, pages 1–3, 2012.

- [41] G. Kramer, B. Mukherjee, and G. Pesavento. IPACT a dynamic protocol for an Ethernet PON (EPON). *IEEE Commun. Mag.*, 40(2):74–80, 2002.
- [42] Glen Kramer, , Biswanath Mukherjee, and Gerry Pesavento. Interleaved polling with adaptive cycle time (IPACT): A dynamic bandwidth distribution scheme in an optical access network. In *Photonic Network Communications*, pages 89–107, 2002.
- [43] Glen Kramer, Biswanath Mukherjee, Sudhir Dixit, Yinghua Ye, and Ryan Hirth. Supporting differentiated classes of service in Ethernet passive optical networks. *J. Opt. Netw.*, 1(8):280–298, Aug 2002.
- [44] Sungoh Kwon and Neung-Hyung Lee. Uplink QoS scheduling for LTE system. In *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd*, pages 1–5, 2011.
- [45] Suk-Bok Lee, I. Pefkianakis, A. Meyerson, Shugong Xu, and Songwu Lu. Proportional fair frequency-domain packet scheduling for 3GPP LTE uplink. In *INFOCOM 2009, IEEE*, pages 2611–2615, April 2009.
- [46] W. Lim, M. Milosavljevic, P. Kourtessis, and M. John. QoS mapping for LTE backhauling over OFDMA-PONs. In *14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pages 1–4, 2012.
- [47] S. N. K. Marwat, Y. Zaki, C. Goerg, T. Weerawardane, and A. Timm-Giel. Design and performance analysis of bandwidth and QoS aware LTE uplink scheduler in heterogeneous traffic environment. In *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2012 8th International*, pages 499–504, 2012.
- [48] SafdarNawazKhan Marwat, Thushara Weerawardane, Yasir Zaki, Carmelita Goerg, and Andreas Timm-Giel. Analysis of radio resource allocation in LTE uplink. *Wireless Personal Communications*, 79(3):2305–2322, 2014.
- [49] Z. Mayer, Jingya Li, A. Papadogiannis, and T. Svensson. On the impact of backhaul channel reliability on cooperative wireless networks. In *Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on*, pages 5284–5289, June 2013.
- [50] O. Nwamadi, X. Zhu, and A. K. Nandi. Dynamic physical resource block allocation algorithms for uplink long term evolution. *IET Communications*, 5(7):1020–1027, 2011.
- [51] T. Orphanoudakis, E. Kosmatos, J. Angelopoulos, and A. Stavdas. Exploiting PONs for mobile backhaul. *IEEE Commun. Mag.*, 51(2):S27–S34, 2013.

- [52] G. Piro. LTE-Sim - the LTE simulator. <http://telematics.poliba.it/LTE-Sim>, 2011 (accessed January 17, 2015).
- [53] G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, F. Capozzi, and P. Camarda. Simulating LTE cellular systems: An open-source framework. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 60(2):498–513, 2011.
- [54] A. Pokhariyal, K.I. Pedersen, G. Monghal, I.Z. Kovacs, C. Rosa, T.E. Kolding, and P.E. Mogensen. HARQ aware frequency domain packet scheduler with different degrees of fairness for the UTRAN long term evolution. In *Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th*, pages 2761–2765, April 2007.
- [55] C. Ranaweera, C. Lim, E. Wong, and A. Nirmalathas. QoS performance of next generation optical-wireless converged network and PON cycle length. In *International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*, pages 176–179, 2012.
- [56] Fengyuan Ren, Yinsheng Xu, Hongkun Yang, Jiao Zhang, and Chuang Lin. Frequency domain packet scheduling with stability analysis for 3GPP LTE uplink. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 12(12):2412–2426, Dec 2013.
- [57] J. Robson. Guidelines for LTE backhaul traffic estimation. NGMN White Paper, July 2011.
- [58] Claudio Rosa, Dimas Lopez Villa, Carlos Úbeda Castellanos, Francesco D. Calabrese, Per-Henrik Michaelsen, Klaus I. Pedersen, and Peter Skov. Performance of fast AMC in E-UTRAN uplink. In *Communications, 2008. ICC '08. IEEE International Conference on*, pages 4973–4977, May 2008.
- [59] L. Ruiz de Temino, Gilberto Berardinelli, S. Frattasi, and P. Mogensen. Channel-aware scheduling algorithms for SC-FDMA in LTE uplink. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. IEEE 19th International Symposium on*, pages 1–6, 2008.
- [60] S. Samarakoon, M. Bennis, W. Saad, and M. Latva-Aho. Backhaul-aware interference management in the uplink of wireless small cell networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 12(11):5813–5825, November 2013.
- [61] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker. *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. Wiley, 2011.
- [62] Ning Wang, Ekram Hossain, and Vijay K Bhargava. Joint downlink cell association and bandwidth allocation for wireless backhauling in two-tier hetnets with large-scale antenna arrays. *arXiv preprint arXiv:1501.00078*, 2014.

- [63] C. Wengerter, J. Ohlhorst, and A.G.E. von Elbwart. Fairness and throughput analysis for generalized proportional fair frequency scheduling in OFDMA. In *Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring. 2005 IEEE 61st*, volume 3, pages 1903–1907 Vol. 3, May 2005.
- [64] Hongkun Yang, Fengyuan Ren, Chuang Lin, and Jiao Zhang. Frequency-domain packet scheduling for 3GPP LTE uplink. In *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE*, pages 1–9, 2010.
- [65] C. Zhang, S.L. Ariyavisitakul, and Meixia Tao. LTE-advanced and 4G wireless communications [guest editorial]. *Communications Magazine, IEEE*, 50(2):102–103, February 2012.