

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Fernando Castelo Branco Gonçalves Santana

*Uma Proposta de Algoritmo de Escalonamento Baseado em
Lógica Nebulosa para Redes LTE (Long Term Evolution)*

São Luís
2016

Fernando Castelo Branco Gonçalves Santana

*Uma Proposta de Algoritmo de Escalonamento Baseado em
Lógica Nebulosa para Redes LTE (Long Term Evolution)*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da UFMA, como requisito parcial para a obtenção do grau de MESTRE em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Rafael Fernandes Lopes

Doutor em Engenharia Elétrica - UFMA

São Luís

2016

Santana, Fernando Castelo Branco Gonçalves

Uma Proposta de Algoritmo de Escalonamento Baseado em Lógica Nebulosa para Redes LTE (Long Term Evolution) / Fernando Castelo Branco Gonçalves Santana - 2016

xx.p

1.Tecnologia Celular de 4ª Geração 2.LTE 3.Escalonador de Recursos 4.Lógica Nebulosa. I.Título.

CDU 536.21

Fernando Castelo Branco Gonçalves Santana

*Uma Proposta de Algoritmo de Escalonamento Baseado em
Lógica Nebulosa para Redes LTE (Long Term Evolution)*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da UFMA, como requisito parcial para a obtenção do grau de MESTRE em Ciência da Computação.

Aprovado em 25 de Julho de 2016

BANCA EXAMINADORA

Prof. Rafael Fernandes Lopes

Doutor em Engenharia Elétrica - UFMA

Prof. Marcelo Sampaio de Alencar

Doutor em Engenharia Elétrica - UFCG

Prof. Francisco José da Silva e Silva

Doutor em Ciência da Computação - UFMA

*Aos meus pais, José Joaquim e Dulcila,
à minha esposa, Ana Caroline, a meu
filho, Fernando Júnior e aos meus avós (in
memoriam), Santana, Raimunda, Waldir e
Florisia.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus, que me guia em todos os momentos da vida.

Aos meus pais, José Joaquim de Santana Filho e Dulcila Castelo Branco Gonçalves Santana e aos meus avós (*in memoriam*), José Joaquim de Santana Neto, Raimunda Pimentel de Santana, Waldir de Figueiredo Gonçalves e Florisa Castelo Branco Gonçalves, que me presentearam com a vida e com a educação para alcançar esta vitória.

À minha esposa, Ana Caroline Rodrigues Santana e ao meu filho, Fernando Castelo Branco Gonçalves Santana Júnior, por compreender meus muitos momentos de ausência e me confortar no seu amor quando as dificuldades bateram em minha porta.

Aos meus tios, primos, familiares e amigos que sempre estiveram presentes com palavras de conforto e incentivo.

Ao meu orientador, professor Rafael Fernandes Lopes, pelos ensinamentos, confiança, paciência e por sua orientação durante as dificuldades encontradas ao longo do percurso.

Ao nosso orientando, José Roberto do Nascimento Júnior, pela parceria e dedicação, fundamentais para aquisição dos resultados positivos apresentados aqui.

Aos professores Marcelo Sampaio de Alencar e Francisco José da Silva e Silva por terem aceito o convite para participação na minha banca de mestrado.

Aos meus colegas e demais professores do curso e do Laboratório de Sistemas Distribuídos e Inteligentes – LSD*i* que, de maneira particular, compartilharam conhecimentos e momentos diversos desta conquista.

Aos colegas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI) – Campus Teresina Central, representados aqui pelos professores Antônio Joaquim da Silva, Fábio de Jesus Lima Gomes, Ayrton de Sá Brandim e Jurandi Oliveira da Silva, que foram grandes incentivadores para a minha participação no mestrado.

À Universidade Federal do Maranhão, pela infraestrutura necessária para a realização deste trabalho.

Resumo

Nas últimas décadas, o aumento da utilização de tecnologias de comunicações móveis tem motivado o desenvolvimento de novas técnicas e algoritmos capazes de prover altas taxas de transmissão em redes celulares. Entre elas, a tecnologia LTE (*Long Term Evolution*) é um dos padrões mais significativos para a telefonia móvel de quarta geração (4G). Devido às suas elevadas taxas de dados, o LTE torna-se muito atraente para vários tipos de aplicações. No entanto, a qualidade das transmissões pode ser severamente impactada pelo processo de escalonamento de recursos de rádio, uma vez que pode levar a flutuações no atraso e nas taxas de dados das aplicações. Para executar a alocação de recursos em redes LTE, o escalonador utiliza vários parâmetros estimados a partir do ambiente de rádio. Esse processo pode levar à ocorrência de estimativas erradas, o que deve ser mitigado de forma a lidar com as imprecisões dos ambientes sem fio. Neste contexto, este trabalho apresenta um escalonador de enlace de descida baseado em lógica nebulosa chamado PAFS (*Performance-Aware Fuzzy Scheduler*). Os resultados mostram que o escalonador proposto promove uma alocação adequada dos recursos de rádio, melhorando o desempenho de diferentes parâmetros de QoS (*Quality of Service* – Qualidade de Serviço) sem comprometer a justiça entre os usuários do sistema.

Palavras-chave: LTE, Lógica Nebulosa, QoS, Escalonador, Comunicações Móveis.

Abstract

In recent decades, the increasing use of mobile technologies has motivated the development of new techniques and algorithms to provide high transmission rates in mobile networks. Among them, LTE (Long Term Evolution) technology is one of the most significant standards for fourth generation (4G) mobile telephony. Due to its high data rates, LTE becomes very attractive to several kinds of applications. However, the quality of the transmissions can be severely impacted by the radio resources scheduling process, since it can lead to fluctuations in the delay and in the application data rates. To perform resource allocation in LTE networks, the scheduler uses various parameters estimated from the radio environment. This process can lead to the occurrence of erroneous estimates, which should be mitigated in order to deal with the inaccuracies of the wireless environments. In this context, this master thesis presents a fuzzy-based downlink scheduler for LTE networks, named PAFS (Performance-Aware Fuzzy Scheduler). The results show that the proposed scheduler promotes a suitable allocation of the radio resources, improving the performance of different QoS (Quality of Service) parameters without compromising the fairness among the system users.

Keywords: LTE, Fuzzy Logic, QoS, Scheduler, Mobile Communications.

O homem erudito é um descobridor de fatos que já existem - mas o homem sábio é um criador de valores que não existem e que ele faz existir.

(Albert Einstein)

Sumário

Lista de Figuras	8
1 Introdução	13
1.1 Objetivos	15
1.2 Estrutura da Dissertação	16
2 Tecnologia de Celular Móvel de 4^a Geração LTE	17
2.1 Arquitetura do Sistema LTE	20
2.2 Camadas da Pilha de Protocolos LTE	24
2.3 Considerações Finais	25
3 Escalonamento de Recursos em Redes LTE	26
3.1 Escalonadores de Enlace de Subida para Redes LTE	29
3.2 Escalonadores de Enlace de Descida para Redes LTE	30
3.2.1 Escalonadores Não Cientes de Canal	33
3.2.2 Escalonadores Cientes de Canal/Não Cientes de QoS	34
3.2.3 Escalonadores Cientes de Canal/Cientes de QoS	35
3.3 Considerações Finais	36
4 Trabalhos Relacionados	37
4.1 <i>Downlink Packet Scheduling in LTE Cellular Networks</i>	37
4.2 <i>Opportunistic QoS-Aware Fair Downlink Scheduling</i>	38
4.3 Um Novo Algoritmo de Escalonamento de Downlink para Redes LTE	38
4.4 Sistema <i>Fuzzy</i> Aplicado à Alocação de Recursos de Rádio em Redes LTE	40

4.5	<i>A Downlink Scheduling Approach for Balancing QoS in LTE Wireless Networks</i>	42
4.6	Considerações Finais	43
5	<i>Performance-Aware Fuzzy Scheduler (PAFS)</i>	44
5.1	Lógica Nebulosa	44
5.2	Arquitetura do Escalonador	46
5.2.1	Pré-processamento dos Dados de Entrada	48
5.2.2	<i>Fuzzificação</i>	49
5.2.3	Regras de Inferência	50
5.2.4	<i>Defuzzificação</i>	51
5.3	Considerações Finais	52
6	<i>Avaliação de Desempenho do Performance-Aware Fuzzy Scheduler (PAFS)</i>	53
6.1	Descrição do Experimento	53
6.2	Experimento com Aplicações de Vídeo	57
6.3	Experimento com Aplicações de VoIP	60
6.4	Considerações Finais	63
7	Conclusão	65
7.1	Contribuições	66
7.2	Trabalhos Futuros	66
	Referências Bibliográficas	68

Lista de Figuras

2.1	Diferença entre os esquemas OFDM e OFDMA na alocação de usuários. . .	19
2.2	Estrutura Funcional da Rede LTE.	20
2.3	Pilha de protocolos da arquitetura LTE.	24
3.1	Escalonamento de recursos nas redes LTE.	26
3.2	Estrutura de um quadro LTE [Sesia et al., 2011].	27
3.3	Esquema de alocação de recursos de rádio em redes LTE.	28
3.4	Esquema de alocação de recursos de rádio de enlace de subida em redes LTE [Astudillo et al., 2014].	30
3.5	Operação de um escalonador de enlace de descida no sistema LTE.	31
5.1	Arquitetura de um sistema nebuloso.	45
5.2	Arquitetura do PAFS.	47
5.3	Função de pertinência para a vazão instantânea, vazão média e atraso de HoL utilizada no PAFS.	50
5.4	Função de pertinência de saída do modulo de <i>defuzzificação</i> do PAFS. . . .	52
6.1	Curvas de BLER com função da relação sinal-ruído para um canal TU com largura de banda de 5 MHz.	55
6.2	Vazão da transmissão de fluxos de vídeo.	58
6.3	Taxa de perda de pacotes da transmissão de vídeo.	59
6.4	Atraso da transmissão de vídeo.	59
6.5	Índice de justiça da transmissão de vídeo.	60
6.6	Vazão da transmissão de fluxos de voIP.	61

6.7	Taxa de perda de pacotes da transmissão de fluxos de VoIP.	62
6.8	Atraso da transmissão de fluxos de VoIP.	62
6.9	Índice de justiça da transmissão de fluxos de VoIP.	63

Lista de Siglas

3GPP	3rd Generation Partnership Project
AM	Acknowledged Mode
ARQ	Automatic Repeat reQuest
AVC	Advanced Video Coding
BET	Blind Equal Throughput
BLER	Block Error Rate
CQI	Channel Quality Indicator
CT	Core Networks & Terminals
EDGE	Enhanced Data Rates for Global System for Mobile Evolution
eNB	Enhanced NodeB
EPC	Evolved Packet Core
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
EXP-PF	Exponential Proportional Fair
FD	Frequency Domain
FDD	Frequency Division Duplexing
FFT	Fast Fourier Transform
FLC	Fuzzy Logic Controller
GBR	Guaranteed Bit-Rate
GERAN	Global System and Enhanced Data Rates for Mobile Evolution Radio Access Networks
GSM	Global System for Mobile
HARQ	Hybrid Automatic Repeat reQuest

HoL Head of Line

HSPA High Speed Packet Access

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

LTE Long Term Evolution

MAC Medium Access Control

MCS Modulation and Coding Scheme

MIMO Multiple Input Multiple Output

M-LWDF Modified Largest Weighted Delay First

MME Mobility Management Entity

MT Maximum Throughput

NAS Non Access Stratum

non-GBR non-Guaranteed Bit Rate

OFDM Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiple Access

PAFS Performance-Aware Fuzzy Scheduler

PDCP Packet Data Convergence Protocol

PF Proportional Fair

PGW Packet Data Network Gateway

PHY Physical Layer

PLR Packet Loss Ratio

PSO Particle Swarm Optimization

PUCCH Physical Control Shared Channel

QCI QoS Class Identifier

QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RB	Resource Block
RE	Resource Element
RLC	Radio Link Control
ROHC	Robust Header Compression
RR	Round Robin
RRC	Radio Resource Control
SA	Service & System Aspects
SDU	Service Data Unit
SGW	Serving Gateway
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TD	Time Domain
TDD	Time Division Duplexing
TM	Transparent Mode
TSG	Technical Specification Group
TTI	Transmission Time Interval
TU	Typical Urban
UE	User Equipment
UM	Unacknowledged Mode
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VT-M-LWDF	Virtual Token Modified Largest Weighted Delay First
WB-CQI	Wide-Band Channel Quality Indicator

1 Introdução

Atualmente diversos setores de atuação humana, como negócios, comércio, serviços e entretenimento, têm se beneficiado largamente do uso de tecnologias de computação móvel. Essas tecnologias têm modificado a forma com que os usuários interagem entre si e com as instituições, criando novas oportunidades econômicas. No entanto, os sistemas de computação móvel requerem a existência de recursos de comunicação sem fio que tipicamente permitam aos seus usuários um alto grau de mobilidade. Dentre as tecnologias mais promissoras, merecem destaque as de comunicações móveis celulares, devido, principalmente, à sua grande disponibilidade e popularidade.

A tecnologia LTE (*Long Term Evolution* – Evolução de Longo Prazo) [Sesia et al., 2011] é um dos padrões mais significativos de telefonia móvel celular de quarta geração (4G) que surgiu com o objetivo de atender à demanda por acesso sem fio a serviços, como a Internet, jogos *online*, VoIP e vídeo conferência [Abrahão, 2015]. Por meio dessa tecnologia, as operadoras são capazes de prover serviços de banda larga móvel com altas taxas de dados e atender a diversos parâmetros de QoS (*Quality of Service* – Qualidade de Serviço) [Albuquerque, 2013]. O LTE foi desenvolvido pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) [3GPP, 2016] para ser uma evolução das diferentes tecnologias de terceira geração, como o UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System* – Sistema de Telecomunicações Universais Móveis) [UMTS, 2015] e o HSPA (*High Speed Packet Access* – Acesso de Pacotes de Alta Velocidade) [HSPA, 2015]. A arquitetura LTE é capaz de prover serviços baseados no protocolo IP (*Internet Protocol*) para comunicações móveis com uma utilização eficiente do espectro eletromagnético, alocação espectral flexível, alta capacidade e cobertura, bem como altas taxas de dados com uma latência reduzida.

Apesar dessas características, o ambiente móvel sem fio pode degradar severamente o desempenho das transmissões de dados em redes LTE. A mobilidade e as flutuações na intensidade do sinal recebido pelos dispositivos são algumas das características que podem deteriorar a qualidade das comunicações, causando fraca

conectividade e diminuindo, conseqüentemente, a qualidade do canal. Na tentativa de reduzir esses efeitos deletérios, várias técnicas da camada física e de enlace são empregadas. No entanto, essas técnicas nem sempre são suficientes, levando à propagação dos erros de transmissão para as camadas superiores da pilha de rede, degradando mais ainda o desempenho das aplicações.

Devido aos problemas referentes aos meios de transmissão sem fio e à escassez dos recursos de rádio, é de vital importância que os sistemas de comunicação LTE sejam capazes de utilizar eficientemente o espectro de radiofrequência, compartilhando-o entre os diversos usuários do sistema, ao mesmo tempo em que visa atender aos seus requisitos de QoS. O escalonador MAC (*Medium Access Control* – Controle de Acesso ao Meio), localizado nas estações base da rede LTE, é o componente responsável por realizar o escalonamento dos recursos nessas redes [Capozzi et al., 2013]. Dependendo dos objetivos específicos de projeto, o escalonador MAC pode aplicar diferentes algoritmos de alocação de recursos que visem, por exemplo, maximizar a vazão total do sistema [Kela et al., 2008, Capozzi et al., 2013], promover a justiça na distribuição dos recursos de rádio [Kela et al., 2008, Capozzi et al., 2013], ou mesmo distribuir os recursos para atender a requisitos de QoS específicos das aplicações [Luo et al., 2010, Piro et al., 2011c, Avramova et al., 2013, Ferdosian et al., 2015a].

Para realizar a alocação de recursos nas redes LTE, o escalonador MAC utiliza diversos parâmetros estimados à partir do ambiente de rádio, como a relação sinal-ruído (SNR – *Signal-to-Noise Ratio*) e os atrasos temporais causados pelo enfileiramento de pacotes. No entanto, canais com más condições de propagação podem levar à ocorrência de estimativas errôneas, fazendo com que o processo de escalonamento fique prejudicado. Dessa forma, é necessário que sejam utilizadas técnicas capazes de lidar com as imprecisões relativas aos ambientes sem fio.

Nesta dissertação é proposto o PAFS (*Performance-Aware Fuzzy Scheduler*), um escalonador MAC para redes LTE baseado em lógica nebulosa (também conhecida como lógica *fuzzy*) [Zadeh, 1996]. O escalonador desenvolvido é capaz de realizar alocação adequada de recursos de rádio diante das imprecisões dos ambientes sem fio. Desse modo, o uso da lógica nebulosa tem como principal objetivo realizar a modelagem computacional e a tomada de decisões em cenários nos quais as entradas sejam, em geral, incertas e imprecisas ou qualitativamente interpretadas [Giupponi & Perez-Neira, 2008]. Assim,

com a capacidade de lidar com essas incertezas e imprecisões, o escalonador é capaz aumentar a eficiência na transmissão de dados nas redes LTE.

Adicionalmente, são apresentados os resultados da comparação entre o PAFS e alguns dos escalonadores clássicos existentes na literatura. Por meio dessa comparação podem ser observados os ganhos do escalonador proposto em relação à vazão global do sistema e a diminuição do atraso e da taxa de perda de pacotes em redes LTE.

1.1 Objetivos

As redes LTE foram desenvolvidas para fornecer altas taxas de dados, baixa latência, acesso via rádio otimizado por pacote e flexibilidade de implementação com diferentes larguras de banda. Entre os desafios encontrados em seu desenvolvimento, estão a necessidade de suportar um grande número de usuários ativos e satisfazer suas diferentes exigências de QoS com quantidade de recursos de rádio limitados [Abrahão, 2015].

A tecnologia empregada nas redes LTE possui mecanismos que visam melhorar a eficiência dos seus sistemas, por meio de técnicas que possam lidar com um grande conjunto de informações vagas ou imprecisas. Entre esses mecanismos, estão os escalonadores de recursos no enlace de descida, que têm como objetivo melhorar o provimento de QoS nas redes LTE [Martins et al., 2014]. Vários tipos de aplicações podem se beneficiar dessas melhorias, tais como as aplicações de fluxos de dados de vídeo e de voz.

Diante disso, esta dissertação de mestrado tem como objetivo propor um escalonador de recursos de enlace de descida baseado em lógica nebulosa, que realize a alocação de recursos de rádio visando melhorar a eficiência global do sistema. Isso é realizado com o aumento da vazão efetiva global, redução do atraso e da taxa de perda de pacotes mantendo níveis aceitáveis de justiça na utilização dos recursos da rede por parte dos usuários ativos.

1.2 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação descreve a arquitetura do PAFS, sua implementação e avaliação de desempenho. Ela está organizada como a seguir: o Capítulo 2 descreve a arquitetura das redes LTE. No Capítulo 3 são apresentados os conceitos relativos ao escalonamento de recursos em redes LTE, bem como os principais escalonadores. O Capítulo 4 discute trabalhos relacionados à dissertação. No Capítulo 5 é descrito o PAFS, mostrando sua arquitetura e como ele melhora a distribuição de recursos de rádio entre os usuários diante das incertezas dos ambientes das redes LTE. O Capítulo 6 mostra os resultados obtidos pela análise de desempenho do escalonador e o Capítulo 7 apresenta as conclusões obtidas, além de descrever os trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos a partir deste esforço inicial.

2 Tecnologia de Celular Móvel de 4^a Geração LTE

A LTE (*Long Term Evolution*) é uma tecnologia de telefonia móvel desenvolvida pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) baseada comutação de pacotes [Martin, 2009]. Essa tecnologia opera sobre uma rede IP e integra os sistemas de voz e dados em um único sistema. Na tecnologia LTE cada UE (*User Equipment* – Equipamento do Usuário) tem um endereço IP na rede, e todos os serviços para esse UE são fornecidos para um dado endereço IP [Rodriguez & Guardieiro, 2015]. Apesar de usar rede IP, o LTE possui ainda compatibilidade com as versões anteriores de redes de telefonia móvel, como as 2G (GSM – *Global System for Mobile / EDGE – Enhanced Data Rates for GSM Evolution*) e 3G (UMTS – *Universal Mobile Telecommunications System / HSPA – High Speed Packet Access*).

O 3GPP é uma associação criada em 1998, que reúne uma série de órgãos normativos de telecomunicações. Seu objetivo é padronizar a evolução dos sistemas de telecomunicações móveis, originados do GSM. O 3GPP define especificações das chamadas tecnologias 3GPP (GSM, UMTS e LTE). A associação possui quatro grupos de especificações técnicas, os chamados TSG (*Technical Specification Group*): redes de acesso de rádio (RAN – *Radio Access Network*), redes principais e terminais (CT – *Core Networks & Terminals*), rede de serviços e aspectos do sistema (SA – *Service & System Aspects*) e GERAN (*GSM EDGE Radio Access Networks*) [3GPP, 2016].

Desenvolvida para melhorar as características das tecnologias de 3^a geração, a tecnologia LTE constitui um novo paradigma para as transmissões de dados em sistemas celulares, visto que permite o acesso às redes de dados de pacotes com baixa latência e altas taxas de transmissão. Entre os diferenciais dessa tecnologia, merece destaque a adoção do esquema OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) nas transmissões no enlace de descida do sistema, permitindo uma maior flexibilidade na alocação de recursos de rádio entre os dispositivos conectados à rede [Abrahão, 2015], bem como um maior controle sobre a QoS provida aos usuários. Além disso, a tecnologia LTE garante

também um atraso em transmissões abaixo de 5 milissegundos na RAN (*Radio Access Network*) [Ghosh et al., 2010].

As metas de desempenho do LTE foram definidas pelo 3GPP em relação à HSPA, tecnologia de 3ª geração anterior à LTE. A taxa de transmissão de pico mínima dos usuários foi estabelecida como 100 Mbit/s no sentido do enlace de descida e 50 Mbit/s no sentido do enlace de subida [Gonçalves, 2011]. O consumo de energia do terminal também foi minimizado, de forma a permitir uma maior autonomia, economizando em momentos de modo de espera e utilizando um tipo de modulação no enlace de subida com menor consumo de energia [Bello Filho, 2014].

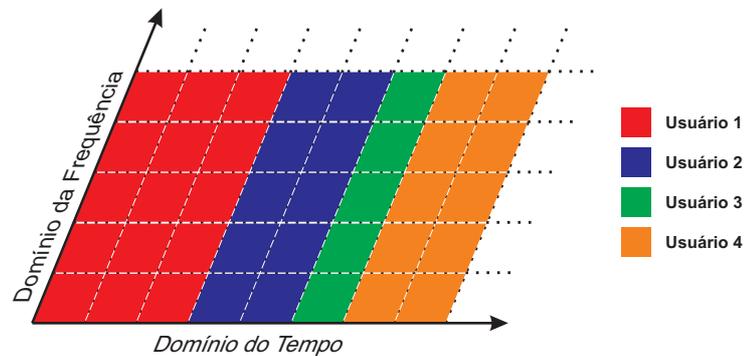
Para conseguir uma maior eficiência em relação às tecnologias anteriores, a LTE usa um esquema de largura de banda flexível, permitindo a utilização do espectro com faixas de diferentes tamanhos, variando de 1,4 a 20 MHz, tanto para canais de enlace de subida, quanto para canais de enlace de descida [Dahlman et al., 2010]. Os dados são transmitidos com o uso de um esquema de modulação e codificação adaptativa que avalia continuamente a intensidade do sinal recebido pelos dispositivos móveis, de modo a alternar entre esquemas de modulação diferentes, como QPSK, 16-QAM, e 64-QAM, obtendo assim, taxas de dados variáveis de acordo com a qualidade do canal de comunicação. Os códigos convolucionais e turbo são combinados com HARQ (*Hybrid Automatic Repeat reQuest*) para correção e recuperação de erros, melhorando a robustez do sistema.

As faixas de frequência destinadas à LTE são distribuídas de acordo com os modos de operação em FDD (*Frequency Division Duplexing*) e TDD (*Time Division Duplexing*). No modo de operação FDD, a comunicação usa diferentes faixas de frequência para diferentes usuários de maneira simultânea. Já o modo TDD usa uma mesma banda de frequência para cada usuário do sistema em cada instante de tempo.

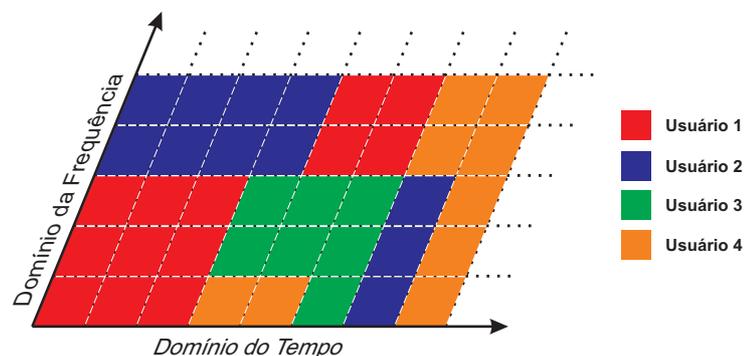
A camada física do LTE foi desenvolvida com técnicas que possibilitam o alcance de alta eficiência espectral, alta capacidade de transmissão de dados e baixa latência. O OFDM é a principal tecnologia da camada física do LTE. O uso de múltiplas portadoras possibilita a organização e a configuração dos recursos de rádio a partir de uma grade tempo-frequência, promovendo maior flexibilidade aos algoritmos de controle da camada de enlace e de alocação de recursos. Outro benefício do OFDM é a possibilidade de gerar um sinal de banda larga a partir de múltiplos sinais de banda estreita. Como o

efeito do canal de comunicação é plano aproximadamente em um sinal de banda estreita, ele pode ser compensado em cada subportadora por meio de um ganho de amplitude e uma rotação de fase. Finalmente, o OFDM tem a vantagem de poder ser implementado no domínio digital a partir do algoritmo FFT (*Fast Fourier Transform*), que é rápido, de baixa complexidade e largamente difundido [Cardoso et al., 2011].

Para melhorar o compartilhamento dos recursos do espectro por múltiplos usuários, é empregada a técnica OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) [Rodriguez & Guardieiro, 2015]. Essa técnica permite o acesso múltiplo por meio da atribuição de subconjuntos de subportadoras a usuários de maneira individual, permitindo a transmissão de informações de um ou mais usuários em um mesmo instante de tempo. A Figura 2.1 ilustra a diferença entre o uso das técnicas OFDM e OFDMA.



(a) OFDM.



(b) OFDMA.

Figura 2.1: Diferença entre os esquemas OFDM e OFDMA na alocação de usuários.

Conforme pode ser visto na Figura 2.1(a), o esquema OFDM, quando utilizado por diversos usuários, realiza a distribuição segmentando o espectro de radio frequência em um conjunto de sub-portadoras e as alocando a um único usuário em um determinado instante de tempo. Por outro lado, o esquema OFDMA (apresentado na Figura 2.1(b)) permite uma distribuição mais flexível dos recursos, visto que conjuntos de sub-portadoras

podem ser utilizadas por usuários distintos no decorrer do tempo.

2.1 Arquitetura do Sistema LTE

A arquitetura do sistema LTE é composta tipicamente por três partes principais: UE (*User Equipment* – Equipamento do Usuário), E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network* – Rede de Acesso de Rádio Terrestre Universal Evoluído) e EPC (*Evolved Packet Core* – Núcleo de Pacotes Evoluído). A arquitetura LTE é apresentada na Figura 2.2.

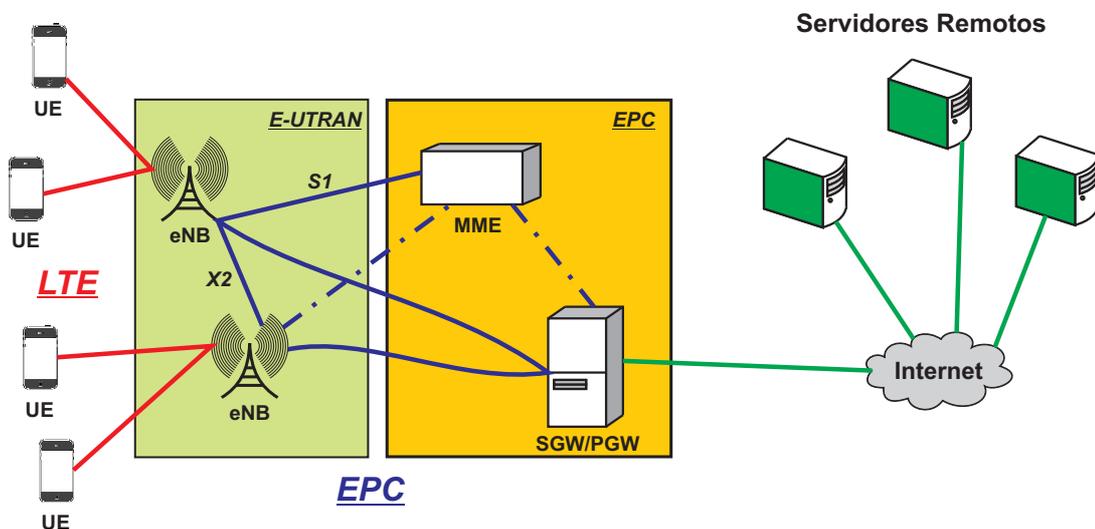


Figura 2.2: Estrutura Funcional da Rede LTE.

O subsistema E-UTRAN trata das comunicações de rádio entre o UE e o EPC, sendo composto pelas interfaces aéreas e pelas estações rádio base, chamadas de eNB (*Enhanced NodeB*), denominadas desta forma, para se diferenciar da nomenclatura utilizada no UMTS (*NodeB*) [Santos & Mello, 2010]. Os componentes do sistema são conectados por meio de diferentes especificações de enlaces, tais como o S1 [3GPP, 2015b], para interconexão dos eNBs com o EPC, e o X2 [3GPP, 2015c], para interconexão entre os eNBs. Cada UE só pode estar conectado a um eNB por vez.

O PGW (*Packet Data Network Gateway*) é o ponto de conexão da rede LTE com outras redes. Cada PGW troca dados com um ou mais dispositivos externos ou redes de dados de pacotes. A cada UE é atribuído um PGW padrão quando ele é ligado, para permitir conectividade constante às redes de pacotes. O PGW aloca os endereços IP para os usuários da rede;

O SGW (*Serving Gateway*) é responsável pelo encaminhamento de pacotes IP entre o dispositivo móvel e a Internet, atuando como um roteador de alto nível e encaminhando dados entre a estação base e o PGW. Uma rede típica pode conter diversos SGWs, cada um responsável por rotear as mensagens dos dispositivos em uma certa região geográfica. A cada dispositivo é atribuído um único SGW que pode ser mudado caso o dispositivo se movimente para uma localização consideravelmente distante. Na arquitetura mostrada na Figura 2.2, é considerado que um único componente atua como SGW e PGW, interconectando as UEs à Internet.

O MME (*Mobility Management Entity*) é o principal elemento de controle no EPC, sendo responsável pelo controle de acesso à rede. Entre suas funções estão gerenciamento de mobilidade do usuário, incluindo autenticação, estabelecimento de conexões, suporte ao *handover*¹ entre diferentes eNBs e entre diferentes tecnologias [Santos & Mello, 2010].

Para o estabelecimento da conexão entre os UEs e as eNBs, são criados canais lógicos, chamados *radio bearers* que são usados para a transferência de mensagens de sinalização RRC (*Radio Resource Control* – usadas na sinalização entre UE e eNB) e NAS (*Non Access Stratum* – usadas na sinalização entre UE e eNB). Quando uma UE se conecta à rede, um *default bearer* é criado para trocar de mensagens de controle, permanecendo ativo por toda a duração da conexão. Para serviços específicos são criados *dedicated bearers* com um conjunto de parâmetros de QoS associados a cada ligação, de acordo com as aplicações. Dependendo dos requisitos de QoS, eles podem ser classificados como GBR (*Guaranteed Bit-Rate* – Taxa de *Bits* Garantida) ou non-GBR (*non-Guaranteed Bit Rate* – Taxa de *Bits* Não Garantida) [Capozzi et al., 2013] [Swetha et al., 2013].

A fim de cumprir os requisitos dos vários tipos de tráfego, a LTE especifica o QCI (*QoS Class Identifier*), que são requisitos de QoS divididos em nove classes conforme Tabela 2.1. Para cada classe é definido o tipo de *bearer*, a prioridade, atraso máximo de pacotes e maior taxa de perda de pacote tolerados.

O tipo de *bearer* indica se o tráfego precisa ser GBR e quais os valores de máximos para os seus parâmetros de QoS. Para prioridade, quanto menor o número, maior é a prioridade dos usuários. Para o atraso de pacotes e a perda, são indicados os

¹Técnica utilizada em redes sem fio para a transição de um dispositivo móvel de uma célula para outra de forma transparente ao usuário.

Tabela 2.1: Classes de Requisitos de QoS [Kuo, 2013].

QCI	Tipo de Bearer	Prioridade	Atraso	Perda	Exemplos
1	GBR	2	100 ms	10^{-2}	Chamadas de Voz
2		4	150 ms	10^{-3}	Chamadas de Vídeo
3		3	50 ms	10^{-3}	Jogos <i>On-line</i> (Tempo Real)
4		5	300 ms	10^{-6}	Fluxos de Vídeo
5	Non-GBR	1	100 ms	10^{-6}	Sinalização IMS
6		6	300 ms	10^{-6}	Vídeo, Serviços TCP
7		7	100 ms	10^{-3}	Voz, Vídeo, Jogos Interativos
8		8	300 ms	10^{-6}	Vídeo, Serviços TCP
9		9	300 ms	10^{-6}	Vídeo, Serviços TCP

valores máximos para cada tipo de aplicação [Kuo, 2013].

O 3GPP padronizou os QCIs com o objetivo de que redes com elementos de diferentes fabricantes ofereçam o mesmo nível de QoS às aplicações e serviços, quando mapeadas a um determinado QCI. Assim, cada QCI padronizado possui um conjunto de características que foram padronizadas e referidas a ele [Souza & Guardieiro, 2012].

Durante a transmissão no sentido do enlace de descida, o eNB irá, com base na qualidade do canal, atribuir recursos disponíveis para diferentes utilizadores e escolher o MCS (*Modulation and Coding Scheme* – Esquema de Modulação e Codificação) apropriado para cada utilizador. A qualidade do canal é estimada pelos UEs do lado do receptor, sendo ele também responsável por transmitir o CQI (*Channel Quality Indicator* – Índice de Qualidade do Canal) para o eNB utilizando o PUCCH (*Physical Control Shared Channel*), já que a CQI representa a qualidade instantânea do canal dos usuários. Com o MCS selecionado é garantida ou não uma comunicação robusta e de boa qualidade. A escolha do MCS adequado, também garante que a BLER (*Block Error Rate* – Taxa de Erro de Bloco) permaneça abaixo de 10^{-1} [Piro et al., 2011c, Nasralla & Martini, 2013]. A Tabela 2.1 mostra como o CQI é representado em termos de taxa de modulação, da taxa

de codificação e da eficiência espectral.

Tabela 2.2: Índice MCS em termos do esquema de modulação, taxa de codificação e eficiência espectral [3GPP, 2015a].

Índice CQI	Esquema de Modulação	Taxa de Codificação ($\times 1024$)	Eficiência Espectral (<i>bits</i> /símbolo)
0	Fora de Alcance		
1	QPSK	78	0,1523
2	QPSK	120	0,2344
3	QPSK	193	0,3770
4	QPSK	308	0,6016
5	QPSK	449	0,8770
6	QPSK	602	1,1758
7	16QAM	378	1,4766
8	16QAM	490	1,9141
9	16QAM	616	2,4063
10	64QAM	466	2,7305
11	64QAM	567	3,3223
12	64QAM	666	3,9023
13	64QAM	772	4,5234
14	64QAM	873	5,1152
15	64QAM	948	5,5547

Conforme apresentado na tabela, cada CQI é mapeado em termos de um esquema de modulação e codificação apropriado. Dessa forma, de acordo com os parâmetros do canal, cada um dos esquemas mostrados é utilizado pelo sistema.

2.2 Camadas da Pilha de Protocolos LTE

A arquitetura de rede LTE trabalha com pacotes IP, possuindo protocolos de gerenciamento para garantir a intercomunicação entre as camadas de sua arquitetura. A Figura 2.3 apresenta as camadas da pilha de protocolos do sistema LTE.

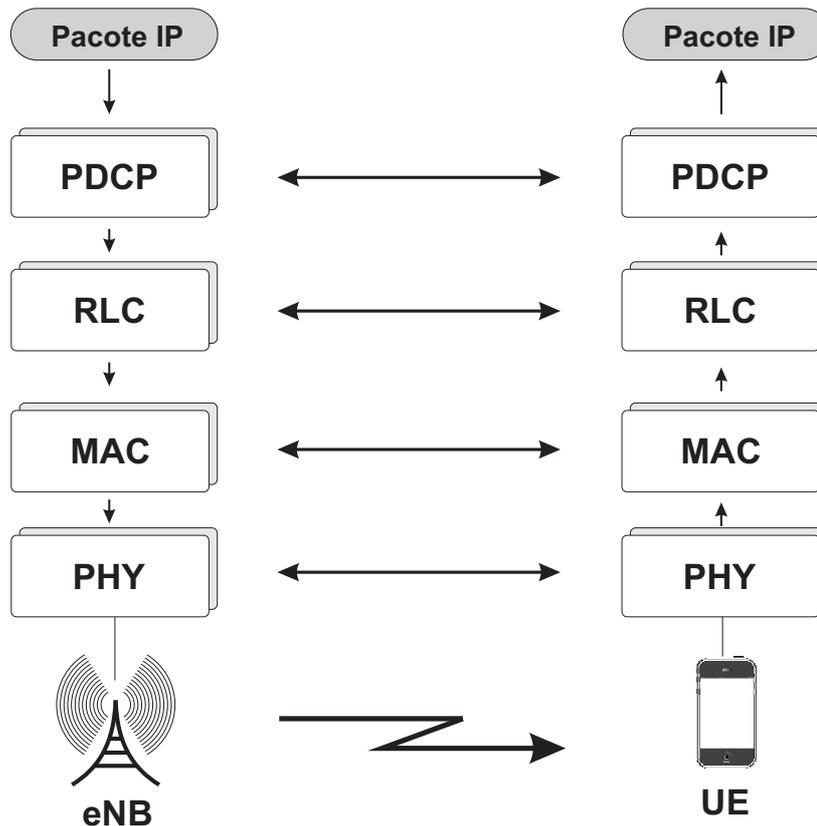


Figura 2.3: Pilha de protocolos da arquitetura LTE.

- PDCCP (*Packet Data Convergence Protocol*) – responsável por realizar a compressão do cabeçalho IP baseado em uma técnica denominada ROHC (*Robust Header Compression*) [Bormann et al., 2001], já utilizada no UMTS. O PDCCP é responsável também pela cifragem e proteção da integridade dos dados transmitidos. No receptor o protocolo PDCCP executa a decifragem e a descompressão. Há uma entidade PDCCP por *radio bearer* configurado para cada terminal móvel.
- RLC (*Radio Link Control*) – executa as funções de segmentação/concatenação/remontagem das SDUs (*Service Data Units*) RLC, reordenação das SDUs, entrega em sequência, e correção de erros por meio do mecanismo ARQ (*Automatic Repeat reQuest*). A camada RLC pode operar em

um dos três modos de confiabilidade: o modo AM (*Acknowledged Mode* – com reconhecimento), modo UM (*Unacknowledged Mode* – sem reconhecimento) ou modo TM (*Transparent Mode* – transparente, quando não é adicionada informação no momento em que o pacote recebido é enviado à camada superior).

- MAC (*Medium Access Control*) – responsável por tratar os canais lógicos e a retransmissão HARQ (*Hybrid Automatic Retransmission Request*). Realiza também o escalonamento de enlace de subida e no enlace de descida.
- PHY (*Physical Layer*) – realiza a codificação, modulação, implementa esquemas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) e outras funções típicas de camadas físicas. A camada física oferece serviços para a camada MAC sobre a forma de canais de transporte.

2.3 Considerações Finais

Este capítulo apresenta detalhes relativos à tecnologia de telefonia móvel LTE (*Long Term Evolution*), descrevendo seus conceitos básicos, bem como sua arquitetura. A partir dessa descrição arquitetural, é possível realizar um estudo aprofundado da operação de sua infraestrutura, identificando aspectos para melhoria.

As redes LTE utilizam uma estrutura baseada no protocolo IP, reduzindo a latência e conseqüentemente conseguindo melhores taxas de dados com redução de custos. Taxas mínimas de 100 Mbit/s e 50 Mbit/s (no enlace de subida e no enlace de descida, respectivamente) devem ser garantidas aos usuários do sistema.

O consumo de energia do terminal também foi minimizado, permitindo uma maior autonomia, economizando em momentos de modo de espera e utilizando tipo de modulação no enlace de subida com menor consumo de energia. As redes LTE possibilitam também um maior número de usuários simultâneos sem perda de eficiência na utilização de diversos serviços disponíveis atualmente nas redes de comunicação.

3 Escalonamento de Recursos em Redes LTE

O uso de escalonamento de recursos para múltiplos usuários é uma das principais características do sistema LTE, sendo responsável por indicar como é feita a distribuição dos recursos disponíveis entre os usuários ativos no sistema [Capozzi et al., 2013].

A Figura 3.1 mostra como é feito o escalonamento de recursos nas redes LTE. Para realizar a distribuição dos recursos de rádio, o escalonador leva em consideração informações da camada física, as configurações da eNB e os parâmetros de QoS das aplicações. De posse dessas informações, o escalonador constroi um mapa de alocação dos recursos de rádio.

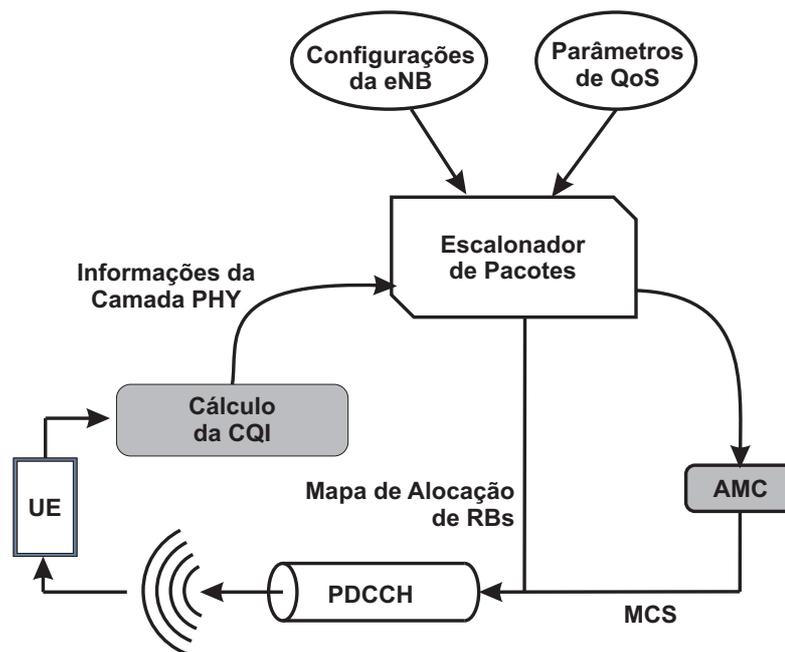


Figura 3.1: Escalonamento de recursos nas redes LTE.

O escalonamento de recursos é realizado em cada eNB, para todas as UEs conectadas a ela, utilizando intervalos de tempo igualmente espaçados, denominados TTI (*Transmission Time Interval*). Esses intervalos de tempo têm duração de 1 milissegundo [Rodriguez & Guardieiro, 2015].

Cada quadro tem a duração de 10 ms e é dividido em 10 subquadros de

um TTI de duração. Além disso, cada TTI é formado por dois intervalos de tempo de 0,5 ms de duração. Um intervalo de tempo é formado por 6 ou 7 símbolos, dependendo do comprimento do seu prefixo cíclico OFDM. No domínio da frequência, a largura de banda total utilizada para a transmissão do quadro é dividida em subcanais com 12 subportadoras de 15 kHz, totalizando 180 kHz. Um intervalo de tempo com 12 subportadoras constitui a unidade básica de recurso de rádio no LTE, chamada de RB (*Resource Block* – Bloco de Recurso) que é composta por vários REs (*Resources Elements* – Elementos de Recursos), cada um representando a transmissão de um símbolo em uma subportadora de 15 kHz. Considerando uma grade de tempo e frequência, um RE equivale a uma única subportadora OFDM espaçada de 15 kHz, durante o intervalo de tempo do símbolo. Na Figura 3.2 é apresentada a estrutura básica de um quadro da grade de tempo e frequência no LTE, para o caso de um prefixo cíclico com sete símbolos [Sesia et al., 2011].

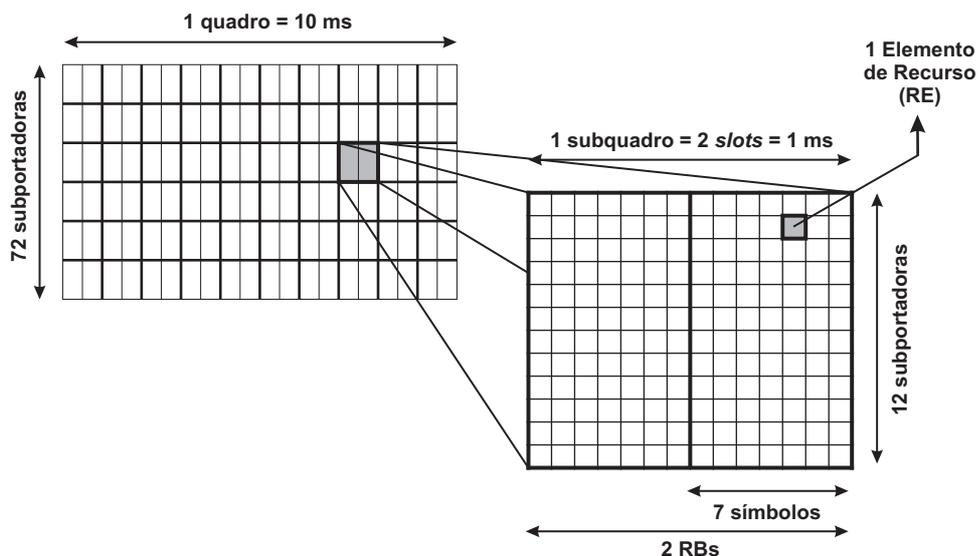


Figura 3.2: Estrutura de um quadro LTE [Sesia et al., 2011].

Embora a definição de um RB em LTE seja a alocação de 180 kHz durante um intervalo de tempo (0,5 ms), neste trabalho, um RB é considerado a unidade de alocação durante um TTI (1 milissegundo). Durante o processo de escalonamento, vários RBs podem ser atribuídos a um único usuário, mas cada RB é atribuído exclusivamente a um usuário [Zhu & Yang, 2015].

O sistema LTE permite uma grande flexibilidade na definição da largura de banda utilizada pela eNB. Por conta da segmentação do espectro de rádio frequência, a largura de banda do sistema corresponde a uma certa quantidade de RBs que podem ser

escalonados, conforme apresentado na Tabela 3

Tabela 3.1: Quantidade de RBs de acordo com a largura de banda disponível no sistema.

Largura de Banda (mHz)	1.4	3	5	10	15	20
Número de RBs	6	15	25	50	75	100

O uso de um bom escalonador pode maximizar a eficiência espectral e reduzir os impactos negativos provocados pelas características do ambiente de rede sem fio [Sulthana & Nakkeeran, 2014]. O escalonador determina, portanto, quais usuários serão priorizados, utilizando algoritmos que levam em consideração um conjunto de requisitos estabelecidos pelo projetista [Capozzi et al., 2013].

Conforme apresentado na Figura 3.3, os RBs dos usuários são escalonados em uma grade de tempo e frequência. Esse escalonamento é realizado priorizando os usuários de acordo com uma métrica de prioridade calculada pelo escalonador de enlace de descida.

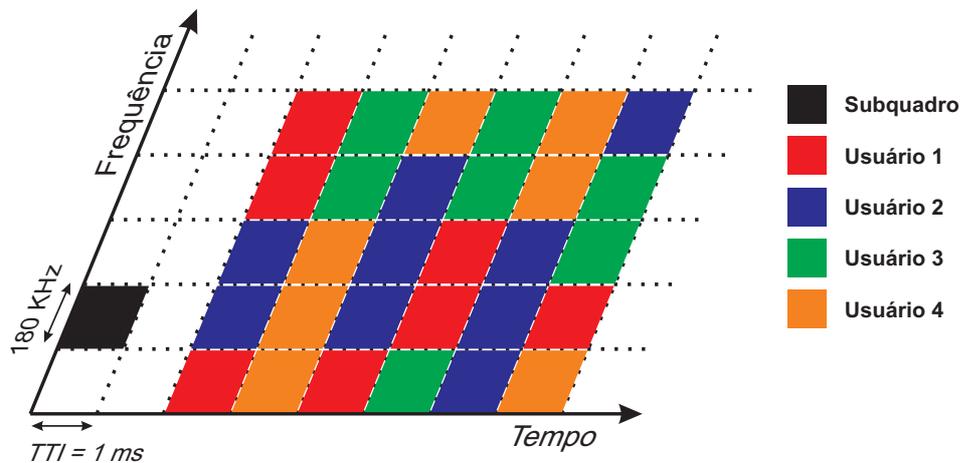


Figura 3.3: Esquema de alocação de recursos de rádio em redes LTE.

Entre os principais objetivos dos escalonadores em redes LTE, estão o aumento da eficiência espectral do sistema, a promoção de justiça e o atendimento dos requisitos de QoS das aplicações. O aumento a eficiência espectral do sistema visa obter a capacidade máxima no uso dos recursos de rádio disponíveis, provendo um aumento da vazão global da célula. A promoção de justiça é feita para melhorar a divisão dos recursos de rádio entre todos os usuários ativos no sistema. O atendimento dos requisitos de QoS das aplicações visa atender os requisitos mínimos de QoS das aplicações.

A prioridade de transmissão de um RB específico é determinada com base

no requisito de desempenho desejado. O cálculo da prioridade é normalmente realizado a partir de informações relativas a cada fluxo de dados, e é usado para a decisão de atribuição durante o processo de transmissão [Capozzi et al., 2013]. Para tanto são levadas em consideração algumas informações. Entre elas estão:

- Estado das filas de transmissão – a redução no atraso das filas de pacotes pode ser usado para minimizar os atrasos de entrega;
- Qualidade do canal – os valores de CQI informados pelas UEs podem ser usados para atribuir recursos aos usuários com melhores condições do canal, aumentando assim a eficiência na utilização dos recursos de rádio;
- Histórico de alocação de recursos – as informações sobre o desempenho histórico dos usuários podem ser usadas para melhorar a justiça na utilização dos recursos de rádio entre esses usuários;
- Qualidade de serviço requisitada pela aplicação – o valor da QCI associado a cada fluxo de dados pode ser usado para atribuição de políticas específicas, com o objetivo de atender aos requisitos de QoS dos usuários.

3.1 Escalonadores de Enlace de Subida para Redes LTE

A transmissão no enlace de subida acontece no sentido da UE para a eNB, sendo enviados os pacotes das aplicações utilizadas no próprio dispositivo móvel aos demais equipamentos e dispositivos que fazem parte da rede ou até mesmo externos a ela. A eNB deve então indicar quais UEs deverão ter acesso ao recurso de rádio em um determinado TTI, para receber seus respectivos pacotes [Maia et al., 2014].

Os escalonadores no enlace de subida nas redes LTE realizam o escalonamento em dois estágios, um escalonamento no domínio do tempo (TD – *Time Domain*) e outro no domínio da frequência (FD – *Frequency Domain*). No primeiro estágio, são tratados os requisitos de QoS, enquanto no segundo estágio, é tratada a diversidade dos usuários durante a alocação dos recursos, conforme apresentado na Figura 3.4.

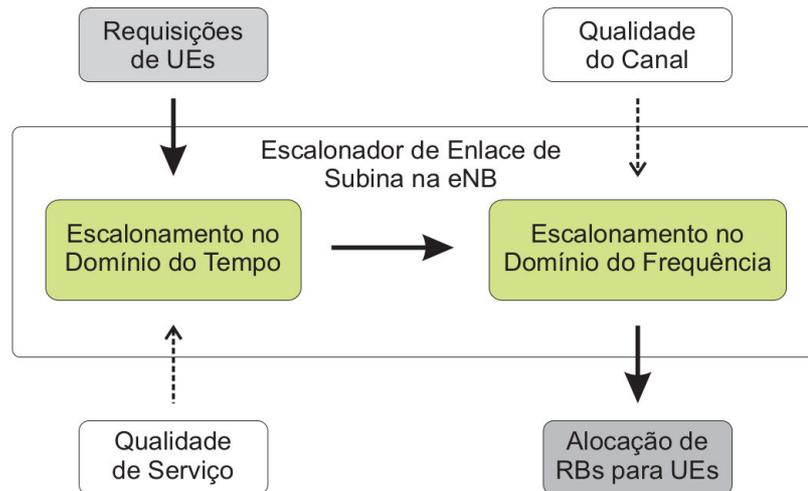


Figura 3.4: Esquema de alocação de recursos de rádio de enlace de subida em redes LTE [Astudillo et al., 2014].

O escalonador do domínio do tempo seleciona um grupo de solicitações dos usuários para serem escalonados no domínio do tempo. O grupo selecionado é passado para o escalonador no domínio da frequência, que determina quais RBs devem ser atribuídos aos usuários, baseado principalmente na qualidade do canal e taxa média de transmissão. O escalonador no domínio do tempo também reduz a complexidade do escalonador no domínio da frequência, limitando o número de solicitações passadas, dado que sua complexidade depende do número de usuários a serem escalonados [Astudillo et al., 2014].

3.2 Escalonadores de Enlace de Descida para Redes LTE

A transmissão no enlace de descida acontece no sentido da eNB para a UE, sendo enviados os pacotes provenientes das aplicações de Internet ou de serviços externos à rede LTE para os dispositivos ativos. Assim como em transmissões no enlace de subida, no enlace de descida, a eNB é responsável por indicar quais UEs deverão ter acesso ao recurso de rádio em um determinado TTI, para receber seus respectivos pacotes.

Os escalonadores de enlace de descida das redes LTE são responsáveis por controlar dinamicamente para quais UEs a eNB deve transmitir os dados e qual quantidade

de recursos deve ser destinada para cada transmissão. A cada TTI, o escalonador aloca os RBs para transmissão pelo canal de enlace de descida para o dispositivo móvel [Ferreira, 2015]. Para isso, uma métrica de prioridade de escalonamento é calculada, a fim de determinar quais UEs devem ser atendidos pelo sistema (com recursos de rádio). A Figura 3.5 ilustra a operação de um escalonador de enlace de descida LTE.

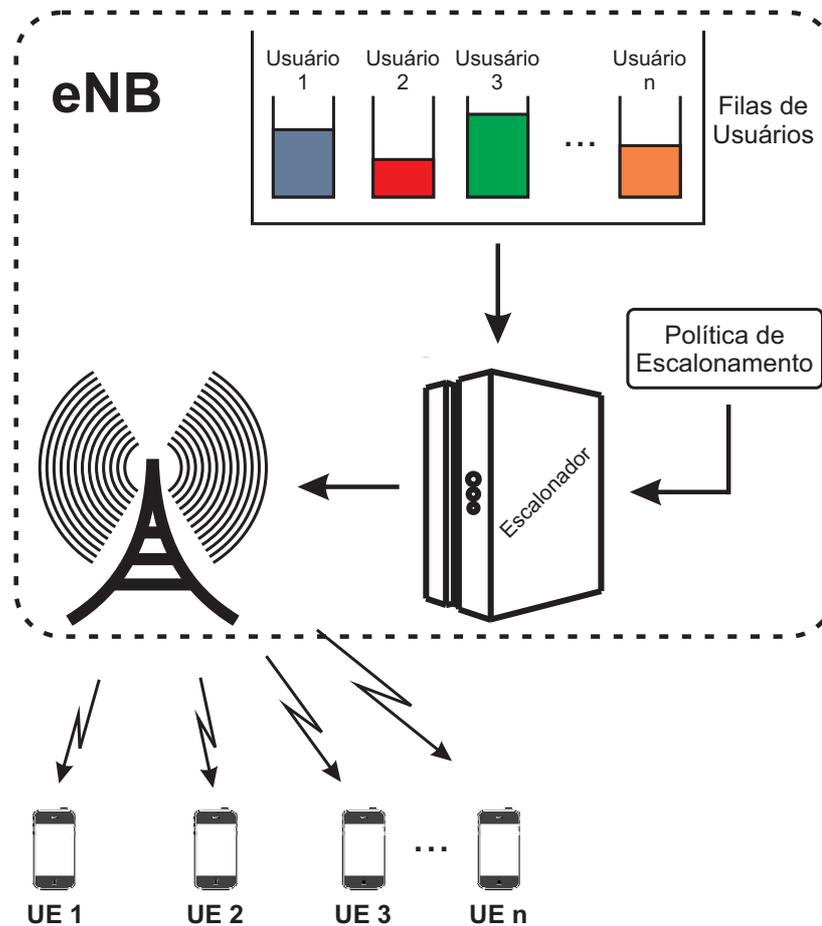


Figura 3.5: Operação de um escalonador de enlace de descida no sistema LTE.

Como pode ser visto na figura, o escalonador é responsável pelo transporte de pacotes das filas de usuários para os UEs. No entanto, em alguns casos, o número de RBs disponível não é suficiente para transmitir todos os pacotes no mesmo TTI. Uma política de escalonamento é então aplicada pelo escalonador, a fim de determinar, de forma dinâmica, quais UEs tem maior prioridade para a transmissão em que cada TTI.

O algoritmo 1 apresenta a lógica de funcionamento do escalonador de enlace de descida utilizado em redes LTE. Durante o processo de escalonamento dos recursos de rádio, são verificados os fluxos ativos no sistema e por meio da métrica de prioridade fornecida pelo algoritmo de escalonamento utilizado, esses recursos são escalonados e

enviados para a transmissão.

Algoritmo 1: ESCALONADOR DE PACOTES EM REDES LTE

```

1 início
2   Seleciona os fluxos a serem escalonados;
3   Verifica o número total e os tipos de fluxo a serem escalonados;
4   Calcula a quantidade de dados a ser transmitidos e eficiência
   espectral do fluxo;
5   Informa ao escalonador (tipo de fluxo, quantidade de dados a ser
   transmitidos, eficiência espectral, indicador de qualidade do canal);
6   enquanto quantidade de fluxos > 0 faça
7     Cria uma matriz para associar a prioridade de escalonamento a
     cada bloco de recurso a ser transmitido;
8     enquanto quantidade de bloco de recursos > 0 faça
9       Adiciona a prioridade do blocos de recursos de acordo com o
       algoritmo de escalonamento utilizado;
10      Define a quantidade de bytes a serem transmitidos em cada
       pacote de acordo com o MCS;
11      Verifica se os fluxos possuem dados a serem transmitidos;
12      se quantidade de bytes > 0 então
13        Adiciona pacotes ao fluxos;
14      fim
15    fim
16  fim
17  Envia os recursos para transmissão;
18 fim

```

As diferenças entre as políticas de alocação de recursos baseiam-se na necessidade de se conseguir um escalonamento aceitável para cada situação, sem aumentar a complexidade computacional. O escalonadores são divididos em classes, conforme a seguir [Capozzi et al., 2013]:

- Não Cientes de Canal – são baseadas na suposição de meios de transmissão com invariantes no tempo e livres de erros;

- Cientes de Canal/Não Cientes de QoS – utilizam parâmetros do canal para realizar o processo de escalonamento dos recursos de rádio;
- Cientes de Canal/Cientes de QoS – utilizam parâmetros do canal e um conjunto de requisitos de QoS das aplicações no processo de escalonamento.

3.2.1 Escalonadores Não Cientes de Canal

Na literatura os principais escalonadores para alocação de recursos não cientes do canal em redes LTE são o RR (*Round Robin*) e o BET (*Blind Equal Throughput*). O RR é um escalonador simples que busca a justiça na partilha de recursos, sem considerar as condições do canal ou requisitos de QoS, porém pode deixar a desejar em termos de vazão global do sistema [Cardoso et al., 2015]. Funciona ordenando os recursos simplesmente de acordo com a ordem de chegada dos pacotes no escalonador. Sua principal vantagem é a garantia de justiça para todos os usuários associada à sua fácil implementação, e a métrica é definida como

$$m_i^{RR} = t - T_i, \quad (3.1)$$

em que t é o tempo atual do sistema e T_i é o tempo de chegada do recurso do i -ésimo usuário no escalonador.

O BET tem como objetivo alcançar a justiça na vazão de dados para todos os usuários conectados, utilizando o histórico de vazão média do usuário para cálculo da métrica de prioridade [Capozzi et al., 2013]. A métrica usada pelo BET para realizar a alocação dos recursos de rádio disponíveis é dada por

$$m_i^{BET} = \frac{1}{R^i(t-1)}, \quad (3.2)$$

em que $R^i(t-1)$ representa a vazão média do i -ésimo usuário até o tempo $t-1$.

No domínio da frequência, o BET primeiro seleciona um UE com a maior métrica e então aloca um RB para o UE em questão, depois calcula a vazão atingida para este UE e a usa para comparar com a última média da vazão das outras UEs. Ele continua alocando RBs para o mesmo UE até que a sua vazão média, quando comparada com as das demais UEs, não seja a menor. Feito isto, o BET deve alocar um RB para um novo UE que possua a menor vazão média e assim a alocação de recurso segue até que todos os RBs sejam alocados naquele TTI [Cardoso et al., 2015].

3.2.2 Escalonadores Cientes de Canal/Não Cientes de QoS

Escalonadores cientes do estado do canal calculam as métricas de alocação de recursos apenas com informações de canal relevantes às UEs, tais como qualidade do canal e média de utilização por parte desses usuários, independente das necessidades requeridas pelas aplicações que estão usando o serviço. Para as estratégias com canal conhecido e sem requisitos de QoS, os escalonadores mais comuns são o MT (*Maximum Throughput*) e o PF (*Proportional Fair*).

O MT, cuja a métrica é apresentada na Fórmula 3.3, busca maximizar a vazão total do sistema, promovendo a maior eficiência espectral possível [Ferdosian et al., 2015b] [Zhou et al., 2013]. Logo,

$$m_i^{MT} = d_i(t), \quad (3.3)$$

em que $d_i(t)$ é a vazão instantânea do i -ésimo usuário no tempo t .

Na busca pela eficiência global do sistema, o MT tende a alocar recursos para os UEs com melhor qualidade do canal, fazendo com que UEs sujeitas a canais de baixa qualidade sejam pouco indicadas pelo escalonador [Zhou et al., 2013]. Para isso, ele seleciona os UEs que tem maior vazão instantânea, alocando os recursos de rádio para os que possuem maiores taxas.

Por outro lado, o PF é uma das estratégias de escalonamento mais populares, pois consegue realizar um balanceamento entre a eficiência espectral e a justiça [Capozzi et al., 2013]. A estratégia é alcançar a justiça proporcional no escalonamento dos RBs para as UEs com a maior relação entre a vazão instantânea e a vazão média de dados transmitidos [Capozzi et al., 2013, Matos et al., 2012]. A seguir é apresentada a métrica de prioridade utilizada pelo escalonador PF.

$$m_i^{PF} = \frac{d_i(t)}{R^i}(t - 1), \quad (3.4)$$

em que $d_i(t)$ é a vazão instantânea e $R^i(t - 1)$ é a vazão média do i -ésimo usuário até o tempo $t - 1$.

3.2.3 Escalonadores Cientes de Canal/Cientes de QoS

Escalonadores cientes do estado do canal e às necessidades de QoS das aplicações, além de levar em consideração as condições do canal no cálculo de suas métricas, utilizam também as restrições de QoS indicadas pelas aplicações [Capozzi et al., 2013]. Os principais escalonadores que visam satisfazer os requisitos de QoS das aplicações no sistema LTE são o M-LWDF (*Maximum Largest Weighted Delay First*) e o EXP-PF (*Exponential Proportional Fair*).

O escalonador de recursos de rádio M-LWDF (cuja métrica é apresentada na Fórmula 3.5) foi projetado para dar suporte a múltiplos usuários com requisitos de QoS variáveis [Basukala et al., 2009]. Ele prioriza os fluxos com atraso mais próximo aos limiares máximos definidos para cada usuário, considerando também a melhor condição de canal em relação aos valores médios de vazão média para cada usuário [Martins et al., 2014], cuja métrica é definida como

$$m_i^{M-LDWF} = \alpha_i D_{HoL,i}(t) \frac{d_i(t)}{R^i(t-1)}, \quad (3.5)$$

em que $\alpha_i = -\frac{\log \delta_i}{\tau_i}$, δ_i é a probabilidade de que os pacotes do i -ésimo usuário sejam descartados por causa do limite de tempo, $D_{HoL,i}$ é o atraso HoL (*Head of Line – Cabeça de Fila*) do i -ésimo usuário, $d_i(t)$ é a vazão instantânea e $R^i(t-1)$ é a vazão média do i -ésimo usuário até o tempo $t-1$.

O EXP-PF consiste na técnica de aumentar a capacidade e maximizar a taxa de dados dos sistemas de comunicações móveis, em que os parâmetros de transmissão do sinal, tais como, esquema de modulação e taxa de código são dinamicamente adaptados às condições do canal, além de utilizar a multiplexação por divisão de tempo [Martins et al., 2014]. Sua métrica é definida como

$$m_i^{EXP-PF} = \exp \left(\frac{\alpha_i D_{HoL,i}(t) - \chi(t)}{1 + \sqrt{\chi(t)}} \right) \frac{d_i(t)}{R^i(t-1)}, \quad (3.6)$$

em que α_i e $D_{HoL,i}$ são parâmetros derivados do escalonador M-LWDF, $d_i(t)$ e $R_i(t-1)$ são, respectivamente, a taxa de dados instantânea e a taxa de dados média do i -ésimo usuário, e $\chi(t)$ é definido como:

$$\chi(t) = \frac{1}{N_{rt}} \sum_{i=1}^{N_{rt}} \alpha_i D_{HoL,i}(t), \quad (3.7)$$

com N_{rt} representando o número de fluxos de tempo real ativos no sistema.

3.3 Considerações Finais

Os escalonadores de recursos das redes LTE são responsáveis por indicar como será feita a distribuição dos recursos disponíveis entre os usuários ativos no sistema [Capozzi et al., 2013]. A escolha de um RB é determinado com base no requisito de desempenho desejado. Entre esses requisitos podem ser citados o estado das filas de transmissão, a qualidade do canal, a vazão média já alcançada por um determinado usuário e a QoS requisitada pela aplicação.

Este capítulo mostra como funciona os mecanismos de escalonamento de recursos de rádio das redes LTE tanto para o enlace de subida (escalonadores que administram os recursos de rádio no sentido da UE para a eNB) quanto para o enlace de descida (escalonadores que administram os recursos de rádio no sentido da eNB para a UE), descrevendo os principais escalonadores clássicos de enlace de descida disponíveis na literatura e seu funcionamento. Entre esses escalonadores estão os escalonadores não cientes de canal (*e.g.*, *Round Robin* e *Blind Equal Throughput*), os escalonadores cientes de canal/não cientes de QoS (*e.g.* *Maximum Throughput* e *Proportional Fair*) e os escalonadores cientes de canal/cientes de QoS (*e.g.*, *Maximum Largest Weighted Delay First* e *Exponential Proportional Fair*).

4 Trabalhos Relacionados

Diversas pesquisas foram realizadas visando o desenvolvimento de novas métricas e algoritmos de escalonamento para redes LTE. Dessa forma, neste capítulo são apresentados alguns trabalhos relacionados à área de escalonamento de recursos de rádio em LTE, realizando análises de suas estruturas bem como uma análise de seus resultados. Esses algoritmos apresentam diferentes abordagens que visam melhorar o processo de escalonamento dos recursos das redes LTE.

4.1 *Downlink Packet Scheduling in LTE Cellular Networks*

O trabalho “*Downlink Packet Scheduling in LTE Cellular Networks: Key Design Issues and a Survey*” [Capozzi et al., 2013] apresenta uma extensa pesquisa sobre as principais estratégias de alocação de recursos de enlace de descida para redes LTE disponíveis na literatura. De acordo com os autores, o trabalho visa prover suporte para o desenvolvimento de novas soluções, voltadas a melhorar o desempenho dos usuários dessas redes. Em conjunto com uma classificação e uma descrição detalhada dos algoritmos de escalonamento, são disponibilizados resultados de experimentos e suas respectivas análises em cenários propostos com o uso do simulador LTE-Sim.

Esse trabalho de pesquisa serviu para a compreensão dos conceitos básicos sobre os algoritmos de alocação de recursos em enlaces de descida nas redes LTE. Nele são apresentados os principais tipos de escalonadores disponíveis na literatura e suas respectivas características, o que serviu de base para o projeto do escalonador PAFS.

4.2 Opportunistic QoS-Aware Fair Downlink Scheduling

No artigo “*Opportunistic QoS-Aware Fair Downlink Scheduling for Delay Sensitive Applications using Fuzzy Reactive and Proactive Controllers*” [Khan et al., 2013] é apresentado um escalonador de recursos de enlace de descida da camada MAC para tráfego sensível ao atraso em sistemas baseados em OFDMA, que utiliza a lógica nebulosa. Com o uso da lógica nebulosa, o escalonador trata incertezas provenientes da natureza dinâmica dos canais de rádio e da alta variação nas taxas de transmissão de vídeo. Com isso, o escalonador proposto permite equilibrar requisitos de atraso de tráfego, o rendimento do sistema e justiça.

No desenvolvimento do escalonador foram implementados dois controladores, um proativo e um reativo. O controlador proativo é responsável por evitar violações de atraso. Isso é realizado fornecendo ao sistema de inferência nebuloso o atraso HoL e a qualidade média do canal com base na CQI. O controlador reativo distribui as perdas de pacotes proporcionalmente entre todos os usuários usando como entrada no sistema nebuloso a taxa de perda de pacotes.

Como resultado do trabalho, foram apresentados ganhos no que diz respeito ao aumento na vazão global do sistema e a diminuição da taxa de perda de pacotes quando comparado ao escalonador M-LWDF. Assim como o escalonador apresentado nesta seção, o PAFS, também utiliza lógica nebulosa para determinar a prioridade de escalonamento, porém são fornecidas variáveis diferentes de entrada para o módulo de inferência nebulosa. O PAFS mostra ganhos quando comparado ao PF e ao EXP-PF, que não foram considerados pelos autores do trabalho. Por fim, o escalonador reativo parece uma abordagem interessante a ser implementada futuramente no PAFS.

4.3 Um Novo Algoritmo de Escalonamento de Downlink para Redes LTE

O trabalho “Um Novo Algoritmo de Escalonamento *Downlink* para Redes LTE” [Rodriguez & Guardieiro, 2015] apresenta um algoritmo de escalonamento com foco

na otimização do uso de recursos de enlace de descida nas redes LTE. O algoritmo tem como principal objetivo a eficiência global do sistema pela da redução da BLER (*Block Error Rate* – Taxa de Erro de Bloco), mantendo uma alta vazão agregada, e sem renunciar a um bom índice de justiça global entre os usuários.

O escalonador proposto no artigo faz com que conjuntos de RBs atribuídas a cada UE tenham as melhores combinações possíveis, de forma que, no momento de serem transmitidas com um único MCS, seja obtida a menor BLER e, conseqüentemente, a máxima eficiência no uso dos recursos disponíveis. Para isso, os autores utilizaram duas matrizes. Uma das matrizes possui os CQIs informados por cada UE para cada RB disponível no sistema, e outra com os valores de eficiência (*bits/símbolo*) desses CQIs, e que serão as principais referências para tomada de decisão do escalonador. O cálculo da eficiência é simplificado de forma que somente o primeiro intervalo de tempo é considerado, já que a unidade mínima de escalonamento é um subquadro, como é mostrado no Capítulo 3 deste trabalho.

Inicialmente é calculado o WB-CQI (*Wide-Band CQI*) que é o CQI equivalente a um conjunto de RBs, obtido a partir do conjunto de CQIs individuais. Após o escalonamento, a eficiência vai depender do MCS selecionado para transmitir os RBs. O valor da WB-CQI é fundamental nesse processo, pois é tomado como referência para calcular o MCS no momento da transmissão. Com isso, o escalonador tentará agrupar RBs para uma UE_x , considerando que esse conjunto de RBs consiga gerar o melhor WB-CQI após o escalonamento. Para calcular o valor de WB-CQI ótimo é executado um processo iterativo sobre os valores de CQI máximo e mínimo informados para os RBs selecionados.

O WB-CQI selecionado será aquele que contribua com a maior quantidade de *bits* transmitidos na mesma unidade de canal em *bits/símbolo*. Com a informação sobre qual o melhor WB-CQI para cada possível grupo de RBs atribuídos a uma UE e a eficiência resultante do escalonamento, o escalonador, processa linhas (RB_x) e as colunas (UE_n), avalia cada RB_x sendo atribuído a essa UE, e escolhe a opção que oferece a maior eficiência em *bits/símbolo*.

Cada vez que um RB_x é adicionado à UE_n , o WB-CQI resultante para essa UE_n é recalculada. Para isso, é criado um vetor de diferenças para RB_x que é processado e servirá para resolver qual UE_n deverá ser beneficiada ao ser associada à RB_x . A eficiência para cada combinação é calculada adotando o melhor WB-CQI para o grupo de RBs no

momento da transmissão.

Para modelar e simular o escalonador proposto é utilizado o simulador de camada de enlace da Technical University of Vienna. Para tanto, foram desconsiderados os efeitos das retransmissões HARQ, evitando assim a existência de efeitos causados pelas retransmissões de blocos de dados com erros.

Enquanto o escalonador apresentado utiliza o CQI de um conjunto de blocos de recursos para conseguir menor taxa de erro de bloco e consequentemente maior eficiência, o PAFS aumenta a eficiência do sistema por meio de um algoritmo baseado em lógica nebulosa que recebe como entrada a vazão instantânea, a vazão média e o atraso HoL.

Para a análise do escalonador foi configurado um sistema LTE com largura de banda de 1,4 MHz evitando assim, uma grande quantidade de tempo de simulação. O PAFS, como no escalonador apresentado aqui, visa melhorar a eficiência espectral geral do sistema, porém, utiliza informações diferentes como entrada, mas que se mostraram eficientes, alcançando bons níveis de vazão e justiça entre os usuários.

4.4 Sistema *Fuzzy* Aplicado à Alocação de Recursos de Rádio em Redes LTE

O esquema de alocação na artigo “Sistema *Fuzzy* Aplicado à Alocação de Recursos de Rádio em Redes LTE Utilizando Estimação de Banda Efetiva” [Abrahão, 2015] tem como objetivo o atendimento de parâmetros de QoS dos usuários e das restrições do esquema de modulação e codificação (MCS) na transmissão de enlace de descida das redes LTE baseado em lógica nebulosa. Para isso, são consideradas a qualidade média do canal e a estimativa da banda efetiva em tempo real, por meio da modelagem multifractal β MWM adaptativa [Riedi et al., 1999] do fluxo de tráfego de cada usuário, para tomar decisões sobre o escalonamento dos recursos de rádio disponíveis. O algoritmo PSO (*Particle Swarm Optimization*), também utilizado, promove o bom equilíbrio entre o atendimento dos objetivos e as restrições do problema de alocação de recursos em sistemas LTE, utilizando estratégias de escalonamento e a lógica nebulosa.

O algoritmo PSO é uma técnica de otimização por enxame de partículas, que

possui uma população de partículas, em que cada partícula representa uma possível solução para o problema de otimização. Cada partícula do enxame possui associado a ela um vetor de posição, isto é, a posição da partícula no espaço de busca, e um vetor de velocidade, responsável por guiar as mudanças de posição das partículas durante a execução do processo. A melhor posição da partícula no enxame é a solução com menor custo. Os vetores velocidade e posição são modelados como variáveis contínuas. Na inicialização, cada partícula possui posição e velocidade aleatórias. O objetivo do algoritmo é fazer com que as partículas movam-se pelo ambiente atualizando suas velocidades dinamicamente de acordo com o histórico das experiências individuais e coletivas de todo o enxame. Logo, a evolução do algoritmo do PSO está associada à trajetória percorrida pelo enxame e ao tempo gasto para encontrar a solução de menor custo.

O esquema de alocação de blocos de recurso proposto nesse trabalho faz o escalonamento baseado em prioridade e um algoritmo de alocação de RB, considerando as restrições do sistema LTE, com relação à utilização do MCS. No sistema LTE, o MCS adotado por um usuário em um TTI deve ser o mesmo para todos RBs atribuídos a ele, em uma configuração de antena única.

Para cada usuário é determinada uma prioridade, calculada de forma adaptativa, por meio de um sistema de inferência nebulosa, considerando a qualidade média do canal, a estimativa da banda efetiva do tráfego de dados para o atendimento de parâmetros de QoS, e a taxa de dados alcançada por cada usuário. A alocação de cada bloco de escalonamento é feita após a determinação da prioridade dos usuários. As prioridades dos usuários são atualizadas após cada alocação de recurso, uma vez que são recalculadas a qualidade média do canal e a taxa de dados alcançada por cada usuário, considerando apenas os blocos de escalonamento ainda disponíveis.

O PAFS também utiliza inferência nebulosa para determinar a métrica de prioridade dos usuários da rede LTE. Porém, enquanto o esquema de alocação apresentado considera a qualidade média do canal e a estimativa de banda efetiva de tráfego de dados para o atendimento dos requisitos de QoS, o PAFS utiliza para a mesma finalidade, a vazão instantânea, a vazão médio e o atraso HoL.

Esse trabalho foi importante na verificação do uso de lógica nebulosa em soluções que tratam entradas no sentido de atender os requisitos de QoS das aplicações.

Outro benefício adquirido com o estudo desse trabalho foi a observação de como é realizado o tratamento das incertezas provenientes do meio com o uso da lógica nebulosa.

4.5 *A Downlink Scheduling Approach for Balancing QoS in LTE Wireless Networks*

No artigo “*A Downlink Scheduling Approach for Balancing QoS in LTE Wireless Networks*” [Nasralla & Martini, 2013] é proposta uma estratégia de alocação de recursos para diferentes classes de tráfego na camada MAC para sistemas sem fio baseados no esquema OFDMA, como por exemplo as redes LTE. Na elaboração do algoritmo proposto foi realizada uma modificação nas regras dos escalonadores VT-M-LWDF (*Virtual Token Modified Largest Weighted Delay First*) e M-LWDF.

A modificação realizada nos escalonadores VT-M-LWDF e M-LWDF tem como finalidade criar um esquema de escalonamento de pacotes que fosse capaz de lidar com várias classes de serviços simultaneamente. Com isso, o algoritmo oferece entrega com requisitos de QoS equilibrados que utiliza o sistema de forma eficiente, podendo o usuário solicitar não só serviços de vídeo e VoIP, mas também os serviços CBR (*Constant Bit Rate* – taxa de dados constantes), navegação na Internet e aplicações de melhor esforço, simultaneamente.

Por meio de simulações, os autores mostram que o escalonador proposto proporcionou uma melhora notável em diversas métricas de desempenho de QoS, como taxa de perda de pacotes, vazão média, índice de justiça e eficiência espectral, entre as diferentes classes de tráfego, como vídeo e VoIP. O artigo contribui com este trabalho no sentido em que provê informações a respeito de cenários de avaliação utilizados para mensurar os ganhos entre diferentes escalonadores, já que diferente do escalonador apresentado, o PAFS utiliza lógica nebulosa na determinação da métrica de prioridade dos usuários.

4.6 Considerações Finais

Os trabalhos apresentados foram importantes na aquisição de conhecimentos relativos aos conceitos das rede LTE e aos algoritmos de escalonamento de enlace de descida. Esses conceitos foram importantes para entender as necessidades e pontos que demandavam estudos para o desenvolvimento de soluções que melhorassem a eficiência no uso dessa tecnologia, promovendo assim uma melhor experiência por parte dos usuários.

O artigo “*Downlink Packet Scheduling in LTE Cellular Networks*” serviu como base de conhecimentos sobre os escalonadores de enlace de descida disponíveis para redes LTE. Os conhecimentos adquiridos durante a leitura do artigo, foram usados durante a etapa de modelagem do escalonador.

Os artigos “*Opportunistic QoS-Aware Fair Downlink Scheduling*” e “Sistema *Fuzzy* Aplicado à Alocação de Recursos de Rádio em Redes LTE” apresentam soluções com o uso de lógica nebulosa. Os resultados apresentados em ambos mostram que a lógica nebulosa é eficiente no tratamento das imprecisões dos ambientes sem fio. Com base nisso, a lógica nebulosa foi usada para melhorar o desempenho geral do sistema no PAFS.

O artigos “Um Novo Algoritmo de Escalonamento de Downlink para Redes LTE” e “*A Downlink Scheduling Approach for Balancing QoS in LTE Wireless Networks*” foram importantes na observação do funcionamento de escalonadores que usam diferentes variáveis de entrada para a métrica de prioridade dos usuários na rede LTE.

Por meio do estudo dos artigos descritos foi possível elaborar os cenários utilizados para a avaliação do PAFS. Esses cenários apresentam situações próximas das encontradas no mundo real e que podem mostrar a eficiência do PAFS em nível mais próximo das situações vividas no dia-a-dia dos usuários das redes LTE.

5 *Performance-Aware Fuzzy Scheduler* (PAFS)

Um bom esquema de alocação de recursos de rádio para redes LTE deve maximizar a taxa de dados total alcançada em cada TTI, melhorando assim o uso da rede por parte dos usuários ativos [Abrahão, 2015] mas sem, no entanto, degradar a justiça na distribuição dos recursos. Diante disto, este capítulo apresenta um escalonador de enlace de descida baseado no uso de lógica nebulosa chamado PAFS (*Performance-Aware Fuzzy Scheduler*). O escalonador proposto visa maximizar a eficiência global do sistema por meio do aumento da vazão total da célula, redução do atraso e da taxa de perda de pacotes, ao mesmo tempo em que mantém níveis aceitáveis de justiça na utilização dos recursos da rede por parte dos usuários ativos.

5.1 Lógica Nebulosa

A lógica nebulosa é uma ferramenta matemática desenvolvida para tomar decisões em situações que as entradas disponíveis geralmente são imprecisas ou qualitativamente interpretadas. Por meio da lógica nebulosa é possível tratar estados do sistema que não são completamente verdadeiros ou mesmo completamente falsos [Giupponi & Perez-Neira, 2008].

O gerenciamento das imprecisões tem um papel particularmente importante, uma vez que a incerteza de informação na base de conhecimento induz a uma conclusão não satisfatória. Nesse contexto, a lógica nebulosa, apresentada por Lofti A. Zadeh em 1964 [Zadeh, 1965], baseia-se na habilidade que o ser humano tem de tratar informações inexatas e imprecisas [Biondi Neto et al., 2006],

A lógica nebulosa baseia-se na ideia de que as variáveis possuem graus de aceitação na inclusão em determinados conjuntos, podendo ser definida como a lógica que suporta os modos de raciocínio que são aproximados. A lógica nebulosa possui a habilidade de inferir conclusões para gerar respostas baseadas em informações vagas, ambíguas e

qualitativamente incompletas e imprecisas [Cavalcanti et al., 2012].

Um conjunto nebuloso é definido por uma função de pertinência. Cada função de pertinência define um conjunto nebuloso, A , do universo, U , por meio da atribuição de um grau de pertinência, μ_A , ente 0 e 1 para cada elemento x de U , sendo este o grau com o qual x pertence a A . A função de pertinência μ_A pode ser definida como:

$$\mu_A : U \rightarrow [0, 1]. \quad (5.1)$$

O universo U contém todos os valores possíveis de μ_A (*i.e.*, U representa o domínio no qual as variáveis consideradas do problema pode assumir valores, tais como a largura de banda de um canal). As funções de pertinência associam, para cada elemento de U , o grau $\mu_A(x)$, se x pertence a A . Se $\mu_A(x) = 0$, então x não faz parte do conjunto; se $\mu_A(x) = 1$ então x está totalmente incluído no conjunto; e se $0 < \mu_A(x) < 1$, então x é parcialmente incluído no conjunto, com grau $\mu_A(x)$.

O sistema nebuloso é composto por um módulo de *fuzzificação*, um módulo de regras, um módulo de inferência nebulosa e um módulo de *defuzzificação* [Liang & Mendel, 2000], conforme apresentado na Figura 5.1. Um sistema capaz de realizar *fuzzificação* e *defuzzificação* por meio de um processo de inferência nebulosa base em um conjunto de regras nebulosas, é chamado de FLC (*Fuzzy Logic Controller*).

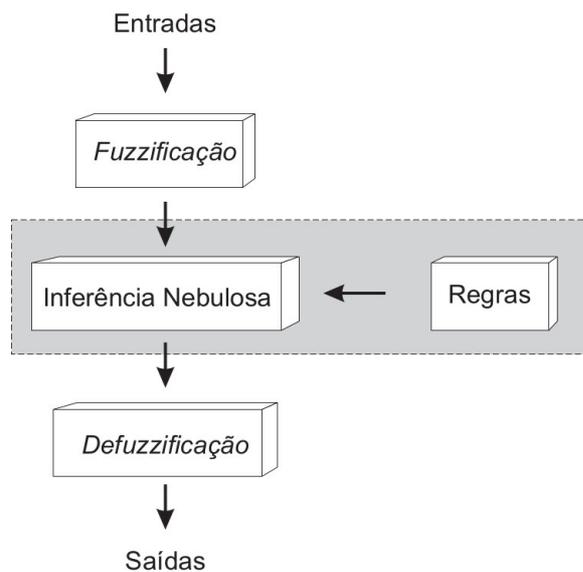


Figura 5.1: Arquitetura de um sistema nebuloso.

O módulo de *fuzzificação* é responsável pela transformação dos dados de

entrada em variáveis linguísticas, sendo associadas a uma função de pertinência. As variáveis linguísticas são aquelas cujos valores são nomes de conjuntos nebulosos. Os valores são descritos por intermédio de conjuntos nebulosos, representados por funções de pertinência.

Os valores das variáveis linguísticas podem ser representados em linguagem específica, por meio de termos primários, de modificadores e de delimitadores. A função das variáveis linguísticas é fornecer uma maneira para caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Assim, um vetor de variáveis de entrada, aciona as regras (proposições nebulosas) e definem a situação (forma) da variável de saída correspondente [Jané, 2004].

O módulo de regras é composto por proposições nebulosas, sendo “ x_1 é A_1 e x_2 é A_2 e ... e x_n é A_n então u_1 é B_1 e u_2 é B_2 e ... e u_m é B_m ”, em que as variáveis linguísticas x_i são modeladas por conjuntos nebulosos A_i (funções de pertinência) [Belluci, 2014]. O conjunto das condições ($A_1, A_2 \dots A_n$) é chamado de conjunto de antecedentes. Já o conjunto das ações (B_1, B_2, \dots, B_m) é chamado de conjunto de consequentes. Quanto maior o número de condições, maior a precisão do resultado.

Defuzzificação é a tradução do resultado linguístico do processo de inferência nebulosa. Como resultado desse processo, é fornecido um valor numérico de saída, obtido a partir dos valores de pertinência do conjunto nebuloso de saída.

5.2 Arquitetura do Escalonador

Um algoritmo de escalonamento eficiente para redes LTE deve manter uma boa relação entre a vazão total da célula e a justiça entre todos os usuários, durante cada TTI. Portanto, novas estratégias devem ser empregadas para melhorar a eficiência do sistema sem prejudicar consideravelmente qualquer grupo específico de usuários. Cenários em que usuários esperam infinitamente pela alocação de recursos de rádio devem ser evitados.

A lógica nebulosa pode ser definida como a lógica que suporta os modos aproximados de raciocínio, permitindo ao sistema inferir conclusões com base em informações vagas, ambíguas e qualitativamente incompletas e imprecisas. Ele pode lidar com a incerteza associada ao processo de estimação e pode descrever o conhecimento do

projetista de uma forma fácil e consistente, proporcionando um mecanismo de raciocínio melhorado.

Este capítulo apresenta um escalonador de enlace de descida baseado no uso de lógica nebulosa para redes LTE, chamado PAFS (*Performance-Aware Fuzzy Scheduler*). O escalonador proposto define a métrica de prioridade dos usuários usando um conjunto de regras nebulosas, calculada a partir de três parâmetros de cada usuário: vazão instantânea, vazão média e atraso HoL (*Head of Line* – Cabeça de Fila). Esses parâmetros foram escolhidos para serem usados no PAFS, principalmente para evitar que novas informações sejam necessárias (quando comparado aos escalonadores clássicos mostrados no Capítulo 3). A Figura 5.2 ilustra a arquitetura do escalonador proposto.

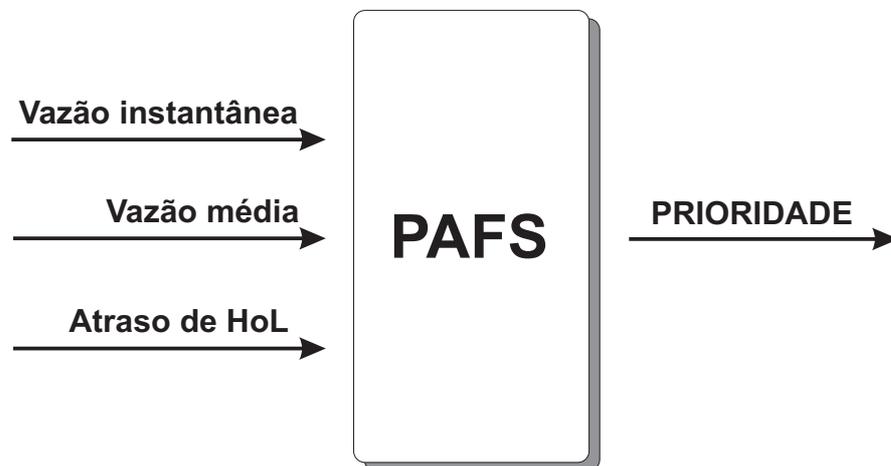


Figura 5.2: Arquitetura do PAFS.

A medida da vazão instantânea é um dos parâmetros utilizados pelas redes LTE para verificar a qualidade do canal dos usuários, uma vez que uma alta vazão indica que os usuários estão em boas condições de canal. Já a vazão média é a vazão atingida pelo usuário por determinado período de tempo. Um usuário com um maior valor de vazão média representa ter utilizado o canal com maiores taxas e mais frequentemente.

O atraso de HoL é o tempo que um pacote leva para ser transmitido, desde o instante em que ele chega na fila de transmissão, até que seja efetivamente enviado. Um alto atraso de HoL pode indicar condições não favoráveis do canal, provocadas por congestionamento ou baixa eficiência espectral. A redução do atraso de HoL pode trazer vários benefícios ao sistema, tais como, a diminuição no atraso fim-a-fim e do descarte de pacotes. Nas seções a seguir são discutidas as etapas do processamento realizadas pelo escalonador proposto.

5.2.1 Pré-processamento dos Dados de Entrada

O primeiro nível de operação do escalonador PAFS consiste em realizar um pré-processamento dos parâmetros de entrada. Durante o processo de escalonamento, três parâmetros são considerados pelo escalonador: vazão instantânea, vazão média e atraso de HoL, que podem assumir qualquer valor real positivo, o que pode dificultar a modelagem apropriada das regras para lidar com diferentes ordens de magnitude. Portanto, técnicas de normalização devem ser aplicadas para prover meios efetivos de comparação dos usuários do sistema.

Diferentes esquemas de normalização são aplicados para as duas medições de vazão e de atraso de HoL. No caso da vazão instantânea e da vazão média, o PAFS cria um fator de normalização baseado nos valores máximos e mínimos obtidos pelos usuários que estão esperando para serem escalonados (usuários com pacotes em suas respectivas filas, o que caracteriza fluxos de dados ativos). A normalização da vazão instantânea é calculada da seguinte maneira

$$T_i^{INST}(t) = \frac{d_i(t) - d_{MIN}(t)}{d_{MAX}(t) - d_{MIN}(t)}, \quad (5.2)$$

em que $d_i(t)$ é a vazão instantânea do i -ésimo usuário, $d_{MIN}(t)$ e $d_{MAX}(t)$ são, respectivamente, o menor e o maior valores de vazão instantânea entre todos os usuários ativos.

Para a normalização descrita na Fórmula 5.2, o valor de entrada de um usuário com vazão instantânea máxima irá corresponder a 1, enquanto o valor mínimo corresponderá a 0. A fim de evitar manipulações incorretas desses valores recebidos do sistema pelo motor de inferência nebulosa, o escalonador fixa os valores limites em 0.0005 e 0.9995.

O mesmo esquema de normalização é aplicado para a vazão média, conforme a seguir

$$R_i^{AVG}(t) = \frac{R^i(t-1) - R^{MIN}(t-1)}{R^{MAX}(t-1) - R^{MIN}(t-1)}, \quad (5.3)$$

em que $R^i(t-1)$ é a vazão média do i -ésimo usuário, $R^{MIN}(t-1)$ e $R^{MAX}(t-1)$ são, respectivamente, o menor e o maior valores de vazão média entre todos os usuários ativos.

Finalmente, para normalização do atraso de HoL é usada uma técnica diferente de normalização, como a proposta em [Brehm & Prakash, 2013]. A fim de permitir que os

utilizadores estabeleçam um atraso de HoL alvo a ser alcançado, o valor deste parâmetro é dividido por um limiar de atraso, τ_i . Assim como em outros escalonadores, todos os pacotes que excedem o limiar de atraso são automaticamente descartados para economizar energia e largura de banda (já que esses são pacotes antigos). O atraso de HoL é então normalizado utilizando a função sigmóide tangente hiperbólica, $\tanh(x)$. Esta função tem uma curva acentuada para a entrada no intervalo $[0, 1]$, o que corresponde a uma entrada durante os períodos normais de tráfego (quando o atraso HoL cumpre a sua restrição). O atraso de HoL é normalizado como a seguir

$$H_i^{HoL}(t) = \tanh\left(\frac{D_{HoL,i}(t)}{\tau_i}\right). \quad (5.4)$$

Depois da etapa de pré-processamento, o escalonador tem acesso aos três parâmetros já normalizados. Esses parâmetros são utilizados como entradas para o mecanismo de *fuzzificação* do escalonador.

5.2.2 Fuzzificação

Nos sistemas nebulosos o processo de *fuzzificação* consiste na transformação dos dados de entrada em estados difusos (variáveis linguísticas) para serem usados na inferência nebulosa. Com essa transformação é possível tratar estados do sistema que não são completamente verdadeiros ou mesmo completamente falsos, mas algum grau de ambos [Klir & Yuan, 1995].

Na etapa de *fuzzyficação* é realizado o processamento das variáveis de entrada para avaliar o grau de pertinência de cada parâmetro (em relação a um conjunto de funções de pertinência), caracterizando-o com termos linguísticos. Por meio da *fuzzificação*, cada valor numérico de vazão instantânea ($T_i^{INST}(t)$), atraso HoL ($H_i^{HoL}(t)$) e vazão média ($R_i^{AVG}(t)$) é convertido em um dos seguintes termos linguísticos: $T(\text{ENTRADA}) = \{\text{BAIXA}, \text{ALTA}\}$.

No PAFS, um conjunto de funções semelhantes foi usado para modelar os graus de pertinência dos três parâmetros de entrada. A Figura 5.3 mostra as funções de pertinência utilizadas no processo de *fuzzificação* do PAFS para os parâmetros vazão instantânea, vazão média e atraso de HoL.

Como pode ser visto na Figura 5.3, um valor de entrada 0,3 para qualquer um

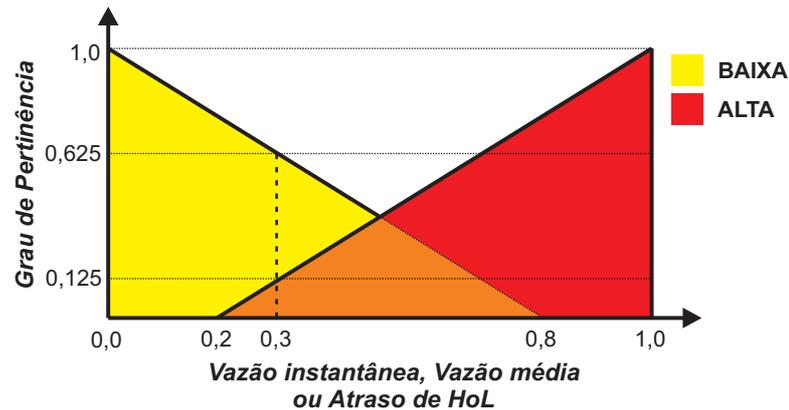


Figura 5.3: Função de pertinência para a vazão instantânea, vazão média e atraso de HoL utilizada no PAFS.

dos três parâmetros, leva a um grau de pertinência de 0,625 para a função de pertinência “BAIXA”, e de 0,125 para a “ALTA”. Esses graus de pertinência são usados pelo sistema de inferência para ativar as regras nebulosas, que determinam o valor de saída do sistema (usando o raciocínio da lógica nebulosa).

5.2.3 Regras de Inferência

O processo de inferência nos sistemas nebulosos é baseado em regras do tipo SE Antecedente ENTÃO Consequente. Essas regras representam a base de conhecimento do sistema. Uma regra é um relacionamento entre dois ou mais conjuntos nebulosos [Cortes, 2004].

Dado que o PAFS visa melhorar o desempenho geral do sistema, as regras nebulosas devem ser concebidas de uma forma eficiente para melhorar a vazão total das células e a equidade dos usuários. Esse equilíbrio pode ser mantido, priorizando os usuários de acordo com seus valores de vazão instantânea e vazão média.

Por outro lado, o parâmetro de atraso de HoL ajuda o escalonador a gerenciar as prioridades de acordo com o comprimento das filas de espera dos usuários. No entanto, no PAFS, o atraso de HoL é usado apenas para distinguir entre os usuários com baixo valor de prioridade, sendo esta definida, principalmente, em função dos valores de vazão. A Tabela 5.1 apresenta as regras nebulosas usadas no escalonador proposto, nas quais VI representa a vazão instantânea, VM a vazão média e HoL o atraso de cabeça de fila.

Para cada regra mostrada na Tabela 5.1, a função de pertinência é calculada

Tabela 5.1: Regras nebulosas usadas pelo sistema de inferência do PAFS.

SE				ENTÃO
REGRA	VI	VM	HoL	PRIORIDADE
1	BAIXA	ALTA	BAIXA	MUITO BAIXA
2	BAIXA	ALTA	ALTA	BAIXA
3	BAIXA	BAIXA	BAIXA	MEDIA
4	BAIXA	BAIXA	ALTA	MEDIA
5	ALTA	ALTA	BAIXA	ALTA
6	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
7	ALTA	BAIXA	BAIXA	MUITO ALTA
8	ALTA	BAIXA	ALTA	MUITO ALTA

(de acordo com as funções apresentadas na Figura 5.3, para cada parâmetro de entrada) O operador “E”¹ é, então aplicado, tendo como resultado um valor de grau de ativação para cada regra $V_w = \mu_j(\text{VI}) \cdot \mu_k(\text{VM}) \cdot \mu_l(\text{HoL})$, em que V_w é o valor da w -ésima regra e $\mu_p(x)$ é a p -ésima função de pertinência (BAIXA ou ALTA) para um parâmetro x (VI, VM ou HoL). Os graus de ativação das regras são então utilizados pelo mecanismo de *defuzzificação* do PAFS para determinar o valor de saída da prioridade dos usuários.

5.2.4 Defuzzificação

Defuzzificação é o processo de produção de um resultado ordinário (também conhecido como *crisp*) quantificável por um sistema nebuloso. Com base em um conjunto de implicações, o sistema nebuloso deve ser capaz de converter suas conclusões em valores reais [Klir & Yuan, 1995]. A parte consequente de cada regra (ENTÃO) indica uma variável de saída que deve ser ponderada pelo grau de ativação da regra (obtido pelo processo de inferência). No PAFS, cinco funções de pertinência de saída estão disponíveis (cada uma associada a um termo linguístico de saída): MUITO BAIXA, BAIXA, MEDIA, ALTA e MUITO ALTA. Cada variável de saída corresponde a um nível de prioridade diferente fornecido para os usuários. A Figura 5.4 apresenta as variáveis de saída disponíveis no escalonador proposto.

¹Neste trabalho, o operador “E” é definido como: $\mu_{A \wedge B} = \mu_A \times \mu_B$.

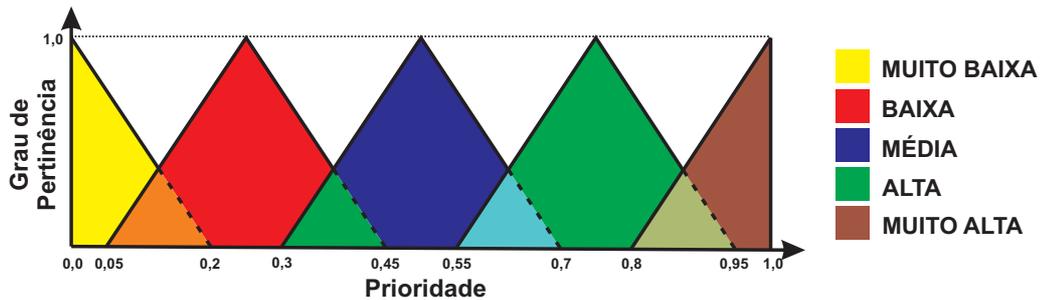


Figura 5.4: Função de pertinência de saída do módulo de *defuzzificação* do PAFS.

Depois do processo de inferência, a saída de cada regra é combinada para formar o conjunto nebuloso final. O método centróide [Bai et al., 2006] é então aplicado durante a fase de *defuzzificação* para obter o valor ordinário correspondente como o valor de prioridade final para o usuário.

O valor de saída mantém uma boa relação entre a maximização da vazão da célula e a equidade entre os usuários. Essa capacidade é modelada por meio das regras nebulosas e é uma característica valiosa do escalonador proposto.

5.3 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado o PAFS (*Performance-Aware Fuzzy Scheduler*), um escalonador desenvolvido com o uso de lógica nebulosa. O escalonador proposto tem como finalidade a distribuição dos recursos de rádio das redes LTE entre os usuários, tratando as incertezas provenientes do sistema e aumentando sua eficiência.

A estrutura do PAFS foi elaborada com o intuito de melhorar a eficiência do sistema. O PAFS prioriza os usuários de acordo com seus valores de vazão instantânea e vazão média, tendo ainda o atraso de HoL como um valor que ajuda o escalonador a gerenciar as prioridades dos usuários de acordo com o comprimento das filas de espera dos usuários.

Para tornar o PAFS mais eficiente no tratamento das informações provenientes dos usuários, foram elaborados esquemas de normalização que fornecem resultados que são inseridos no sistema de escalonamento baseado em lógica nebulosa. Esse escalonador retorna uma prioridade de escalonamento que a posteriormente é atribuída aos pacotes das UEs que estão aguardando na fila de alocação de recursos da eNB.

6 Avaliação de Desempenho do *Performance-Aware Fuzzy Scheduler* (PAFS)

Neste capítulo é apresentada uma avaliação de desempenho do PAFS (*Performance-Aware Fuzzy Scheduler*). Também é apresentada aqui uma descrição do ambiente utilizado nos experimentos.

Os experimentos realizados para a avaliação do PAFS utilizam o LTE-Sim [Piro et al., 2011b], um simulador de redes LTE desenvolvido para avaliar estratégias de escalonamento de enlace de subida e enlace de descida em ambientes com uma ou várias células (eNB) e multi-usuários. Para isso, o LTE-Sim possui os principais componentes da arquitetura LTE, incluindo o UE, E-UTRAN (eNB), EPC (MME/PGW/SGW), além de gerar fluxo para tráfego de dados, como vídeo e VoIP. O LTE-Sim permite simular o gerenciamento da QoS dos usuários com o uso de diferentes estratégias de escalonamento de pacotes [Matos et al., 2012].

Os testes foram realizados no Laboratório de Sistemas Distribuídos Inteligentes (LSDi) da Universidade Federal do Maranhão (UFMA). Para a realização dos experimentos foram utilizados três servidores disponíveis no laboratório, conforme especificação da Tabela 6.1.

A seguir é apresentada uma descrição do experimento, mostrando como foi configurado o ambiente para a avaliação de desempenho do PAFS. Além disso, a caracterização do ambiente de rádio e os resultados dos experimentos são descritos nas seções seguintes.

6.1 Descrição do Experimento

O cenário utilizado no experimento é composto por uma única célula com raio de cobertura limitado a 1 km, incluindo uma eNB com potência de transmissão

Tabela 6.1: Especificação dos servidores do LSDi utilizadas nos experimentos.

Servidores	Processador	Memória	Sistema
		RAM	Operacional
Giotto	Intel Xenon ES-2430 v2 de 2.50 GHz (6 núcleos físicos – 12 lógicos)	24 gigabytes	Ubuntu 16.04
Portinari	Intel Xenon ES-2430 v2 de 2.50 GHz (6 núcleos físicos – 12 lógicos)	24 gigabytes	Ubuntu 16.04
Romero Brito	Intel Xenon ES-2430 v2 de 2.50 GHz (6 núcleos físicos – 12 lógicos)	24 gigabytes	Ubuntu 16.04

de 43 dBm, configurada com largura de banda de 5 MHz (25 RBs). O cenário para simulação ainda foi configurado com uma estrutura de quadro FDD (*Frequency Division Duplex*), modelo de desvanecimento de Jakes, frequência da portadora de 2 GHz, modo RLC UM (*Unacknowledgement Mode*), modelo de modulação e codificação adaptativa de Piro [Piro et al., 2011c], modelo de perda por propagação em ambiente urbano com macrocélulas [3GPP, 1999], modelo de erros do canal 3GPP-TU (*Typical Urban*) [3GPP, 2001] e atraso máximo de 0,1 segundo.

O conjunto de UEs utilizado no experimento foi configurado com potência de transmissão de 23 dBm, variando entre 10 e 100 dispositivos. A movimentação dos usuários no espaço simulado foi realizada de forma aleatória (*Random Way-Point* – Modelo de Mobilidade Aleatória) e velocidade de 3 km/h (pedestre).

O canal é modelado com o cenário 3GPP TU (*Typical Urban* – Tipicamente Urbano) [3GPP, 2016], sujeito a uma perda por propagação urbana [3GPP, 2010], dada por

$$L = 128.1 + 37.6 \log_{10} d, \quad (6.1)$$

em que d é a distância entre a UE e a eNB.

A BLER é a razão entre o número de blocos perdidos e o número de blocos enviados [3GPP, 2006], sendo calculada, na avaliação, por meio da interpolação dos valores de BLER ilustrados nas curvas mostradas na Figura 6.1. As curvas foram obtidas por simulação, utilizando o simulador Vienna LTE link-level [Mehlführer et al., 2011] para

os 15 valores de CQI disponíveis no sistema (conforme apresentado na Tabela 2.1 do Capítulo 2) com uma largura de banda de 5 MHz e canal TU.

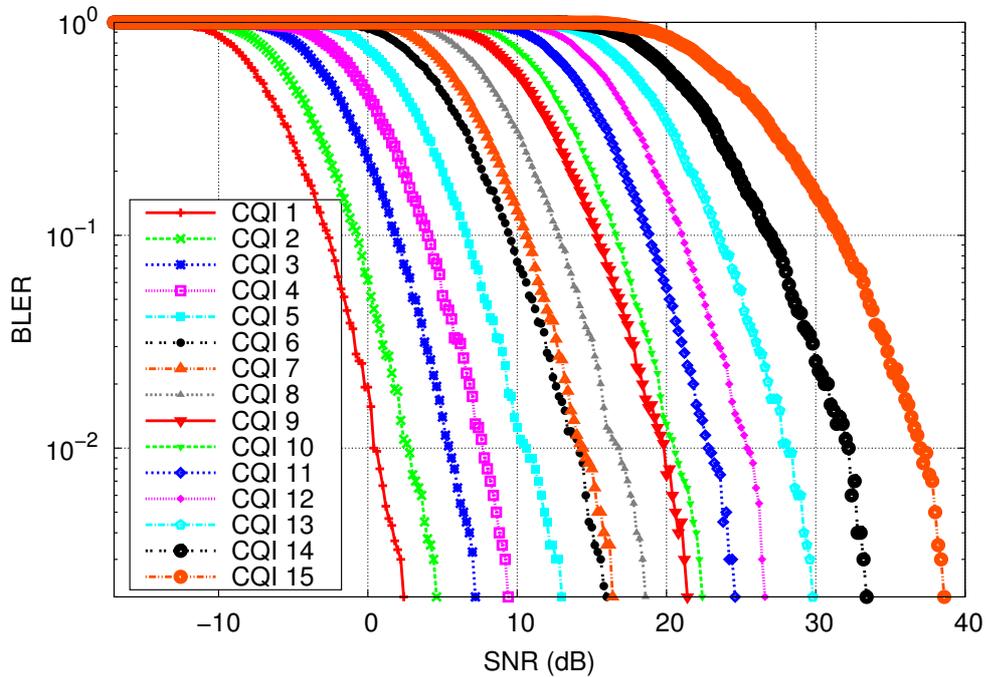


Figura 6.1: Curvas de BLER com função da relação sinal-ruído para um canal TU com largura de banda de 5 MHz.

Durante o processo de alocação de recursos, a eNB seleciona o MCS mais adequado para cada fluxo de dados a ser transmitido, com o objetivo de minimizar a perda de pacotes causada por erros de canal. O CQI é utilizado pela UE para comunicar ao eNB a taxa de dados mais elevada que pode ser alcançada em uma dada RB, garantindo pelo menos um determinado valor de BLER alvo [Piro et al., 2011c]. No sistema proposto, a BLER padrão para comutação do MCS do sistema é de 10^{-1} .

As aplicações de vídeo e VoIP são caracterizadas pela exigência de métricas a serem atendidas para que o desempenho da aplicação seja satisfatório [Matos et al., 2012]. Assim, neste trabalho, são utilizadas como métricas para avaliação dessas aplicações a vazão, a PLR (*Packet Loss Ratio* – Taxa de Perda de Pacotes), o atraso e o índice de justiça. Para o cálculo do índice de justiça é usado o método proposto por Jain [Jain et al., 1984].

O índice de justiça de Jain [Peterson & Davie, 2013], corresponde à justiça no uso dos recursos de rádio durante os experimentos com os algoritmos de escalonamento, conforme apresentado na Fórmula 6.2. O valor máximo para esse índice é 1, que é

alcançado quando todos os usuários atingem a mesma vazão. Logo,

$$I_j = \frac{(\sum^F V_f)^2}{F \times \sum^F (V_f)^2}, \quad (6.2)$$

em que F é o número de fluxos de dados e V_F a vazão do F -ésimo fluxo de dados [Jain et al., 1984].

No experimento são utilizadas aplicações do tipo VoIP implementadas no LTE-Sim com o codec G.729 e taxa de 8 kbit/s e aplicações de vídeo que usam o padrão de codificação H.264 (padrão para compressão de vídeo baseado no MPEG-4 Parte 10 AVC – *Advanced Video Coding*), com taxas de 242 kbit/s e fluxo com duração de 54 segundos. A Tabela 6.1 apresenta todos os parâmetros usados na construção do cenário utilizado no experimento.

Os resultados obtidos com o PAFS são comparados com três outros algoritmos de escalonamento (PF, M-LWDF e EXP-PF) disponíveis no LTE-Sim. Foram realizadas 10 replicações das simulações com duração de 60 segundos em três rodadas, e tendo como resultados, as médias dos resultados obtidos nas 3 rodadas de replicações.

Os algoritmos escolhidos para avaliação, assim como o PAFS, são sensíveis às condições do canal. O PF, usa como informações de entrada a vazão instantânea e a vazão média. Já os escalonadores M-LWDF e EXP-PF usam para o cálculo de sua métrica de prioridade, entre outras informação, o atraso HoL.

O cenário proposto para a simulação visa analisar o PAFS em situações de aumento da sobrecarga do ambiente de rede LTE. Essa sobrecarga pode aumentar as características instáveis do meio sem fio e aumentar o problemas nas transmissões causados por ele.

A seguir são apresentados os resultados obtidos no experimento realizado com o cenário descrito nesta seção. Primeiramente, são apresentados os resultados do experimento realizado com aplicações de vídeo e, posteriormente, é apresentada a avaliação de uma aplicação de VoIP.

Tabela 6.2: Parâmetros da simulação.

Parâmetro	Valor
Tempo de Simulação	60 segundos
Quantidade de eNBs	1
Estrutura do Quadro	FDD (<i>Frequency Division Duplex</i>)
Raio da Célula	1 km
Largura de Banda para Downlink	5 MHz (25 RBs)
Frequência da Portadora	2 GHz
Modo RLC	UM (<i>Unacknowledgement Mode</i>)
Modo AMC	Modelo de Piro [Piro et al., 2011a]
Modelo de Perda por Propagação	Ambiente Urbano com Macrocélulas [3GPP, 1999]
Modelo de Erros do Canal	3GPP-TU (<i>Typical Urban</i>) [3GPP, 2001]
Atraso Máximo	0,1 segundo
Potência de Transmissão da UE	23 dBm
Potência de Transmissão da eNB	43 dBm
Número de Usuários	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100
Distância Percorrida pela UE	50 metros
Modelo de Mobilidade	<i>Random Way-Point</i>
Modelo de Desvanecimento	Modelo de Jakes
Velocidade dos Usuários	3 km/h (pedestre)
Tipos de Aplicação	VoIP e Vídeo
Taxa de Transmissão de VoIP	8 kbit/s
Taxa de Transmissão de Vídeo	242 kbit/s
Duração dos Fluxos de Vídeo	54 segundos
Escalonadores Avaliados	PF, MLWDF, EXP-PF e PAFS

6.2 Experimento com Aplicações de Vídeo

O constante aumento dos recursos multimídia dos dispositivos móveis acarreta um aumento dos serviços baseados em vídeo, sendo a transmissão de fluxos de vídeo em tempo real um dos serviços mais populares na Internet. Esses serviços apresentam maiores requisitos de taxa de transmissão e restrição de atraso. Para lidar com estes desafios, a

tecnologia LTE apresenta-se com capacidade de atender essas necessidade em ambientes móveis [Franco, 2013].

Diante disso, foi realizada uma análise do escalonador PAFS para verificar sua eficiência na transmissão de vídeo em ambiente móvel. Nos experimentos foram realizadas transmissões de fluxos de vídeo com duração de 54 segundos e uma taxa de *bits* de 242 kbit/s em uma rede LTE, com os algoritmos PF, M-LWDF e EXP-PF, além do próprio PAFS.

A Figura 6.2 apresenta a vazão do sistema para cada escalonador analisado em função da quantidade de UEs na célula. Pode ser observado na figura que, com o aumento do número de usuários, a vazão geral do sistema também tende a aumentar. No entanto, pode-se notar que a vazão do sistema, com os escalonadores PF, EXP-PF e M-LWDF, reduziu a partir de 70 UEs. Isso é causado principalmente pelo fato dos três escalonadores não conseguirem distribuir de forma eficiente os RBs entre os usuários, aumentando os tamanhos das filas (e o atraso de HoL) acima do valor do limiar máximo do atraso, provocando descarte de pacotes.

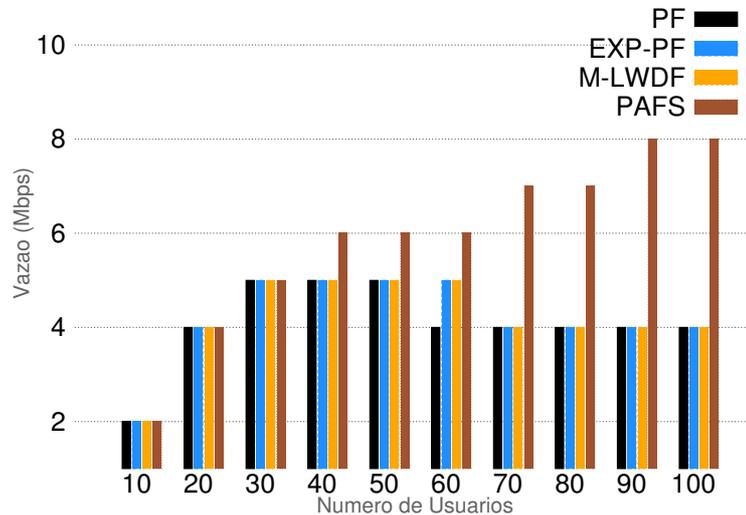


Figura 6.2: Vazão da transmissão de fluxos de vídeo.

A PLR é outra métrica de QoS importante a ser comparada. Pode ser visto, na Figura 6.3, que a taxa de perda de pacotes aumenta à medida que a quantidade de UEs aumenta (uma vez que o número de 25 RBs é insuficiente para atender a todos os usuários simultaneamente). O PAFS apresentou a menor taxa de perda de pacotes entre os quatros escalonadores analisados, mostrando que pode distribuir eficientemente os RBs

entre os usuários, quando comparado com os demais escalonadores.

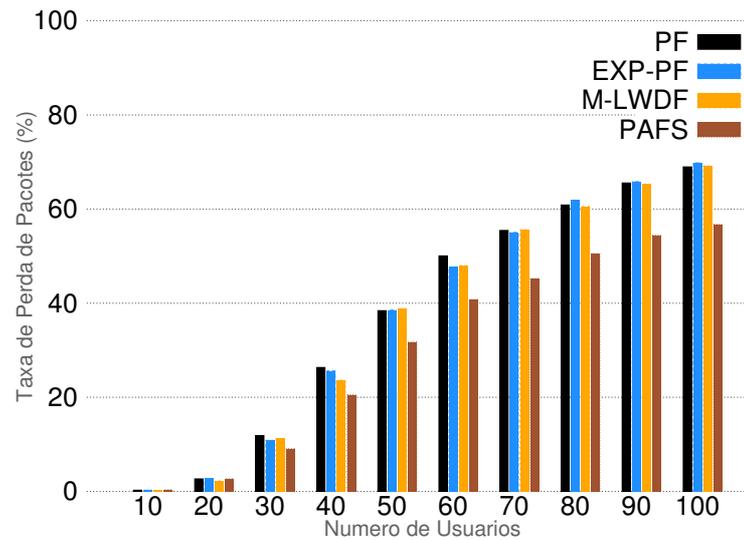


Figura 6.3: Taxa de perda de pacotes da transmissão de vídeo.

Como o PAFS consegue distribuir de forma eficiente os recursos entre os usuários, as filas dos usuários na eNB tendem a ser menores, diminuindo o atraso fim-a-fim. A Figura 6.4 mostra que os PAFS supera os outros escalonadores analisados com valores de atraso bem menores.

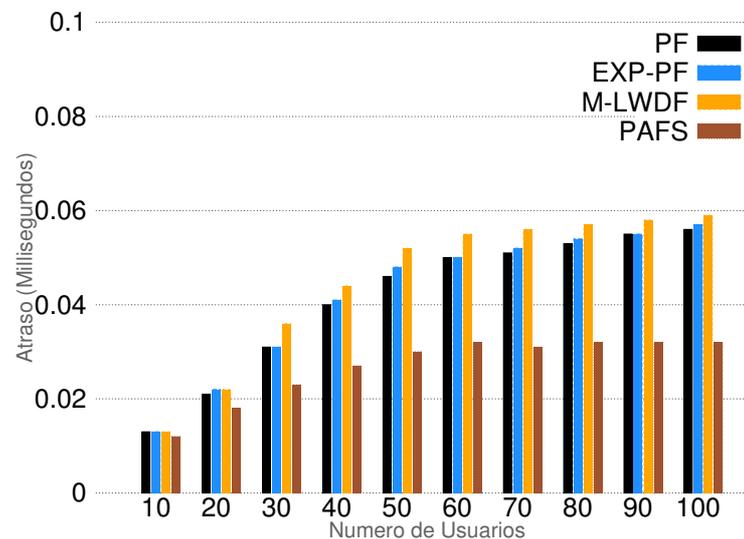


Figura 6.4: Atraso da transmissão de vídeo.

Durante as transmissão de fluxos de vídeo, alguns usuários estão em melhores condições de canal e conseqüentemente, conseguem obter melhores taxas de transmissão de dados nos ambientes sem fio. É importante a utilização de mecanismos que possam promover justiça na utilização dos recursos de rádio a todos os usuários ativos no sistema.

Diante disso, os escalonadores de enlace de descida podem ser utilizados nessa distribuição mais justa entre os usuários das redes LTE, já que são os responsáveis por indicar quais os usuários terão acesso aos recursos de rádio em cada intervalo de tempo.

A Figura 6.5 ilustra os resultados da avaliação em termos do índice de justiça de Jain, em função da quantidade de UEs. Como mostrado na figura, antes de 70 UEs, os resultados obtidos pelo PAFS são muito semelhantes aos dos outros escalonadores, com uma pequena redução. No entanto, entre 70 e 100 UEs, o PAFS apresenta um maior valor para o índice de justiça, o que impacta diretamente nas outras métricas.

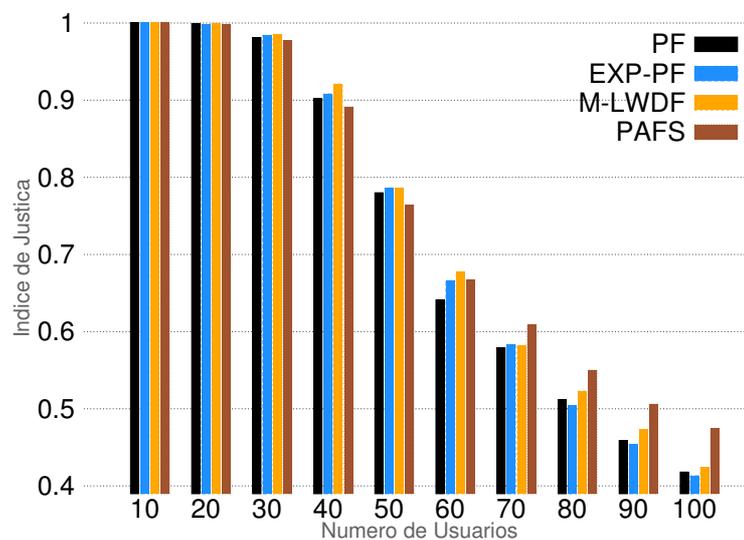


Figura 6.5: Índice de justiça da transmissão de vídeo.

Conforme apresentado nessa seção, pode-se observar que o PAFS atingiu melhores taxas de vazão geral do sistema, principalmente com o aumento da quantidade de UEs ativas no sistema. Em relação ao atraso e à PLR, o PAFS conseguiu uma redução quando comparado aos demais escalonadores. Por fim, o PAFS, de acordo com o índice de Jain conseguiu manter escalas de nível de justiça semelhantes aos demais escalonadores analisados.

6.3 Experimento com Aplicações de VoIP

A tecnologia VoIP (*Voice over Internet Protocol* – Voz sobre IP) realiza a digitalização e a codificação de sinais de voz, bem como o empacotamento de dados de voz para transmissão em redes que utilizam a arquitetura TCP/IP. As aplicações de VoIP

são sensíveis ao atraso, apresentando diversos problemas em redes com tempos de atraso altos, como acontece em ambientes sem fio. Diante disso, a tecnologia de escalonamento de pacotes das redes LTE deve exercer um papel fundamental na redução do atraso por meio da alocação eficiente de recursos de rádio.

Como pode ser visto na Figura 6.6, o escalonador proposto conseguiu uma vazão semelhante aos demais escalonadores avaliados. Isso acontece principalmente devido à baixa taxa de *bits*, característica do tipo de fluxo de dados VoIP, fazendo com que não haja necessidade de alocação de muitos recursos. Pode ser observado que a vazão geral do sistema aumenta à medida que a quantidade de usuários aumenta, um reflexo de que não existe saturação do sistema para quantidade de UEs inferiores a 100.

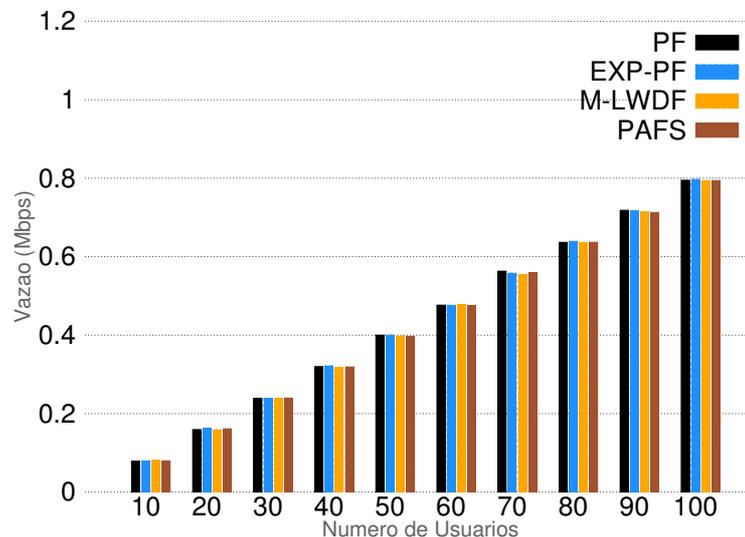


Figura 6.6: Vazão da transmissão de fluxos de VoIP.

O PAFS apresentou uma melhoria significativa na redução das taxas de perda de pacotes em fluxos VoIP quando comparado aos escalonadores clássicos avaliados, como mostrado na Figura 6.7. Para todas as quantidades de UEs avaliadas, o PAFS sempre apresenta uma PLR menor do que 50% do valor atingido pelos escalonadores PF, EXP-PF e M-LWDF, mostrando uma redução considerável em relação à PLR.

Da mesma forma que na análise das aplicações de vídeo apresentada na Seção 6.2, o PAFS distribuiu de maneira eficiente os recursos entre os usuários dos fluxos de dados VoIP, reduzindo as filas dos usuários na eNB e o atraso fim-a-fim, mesmo com o aumento da quantidade de UEs ativos no sistema, conforme mostrado na Figura 6.8. Pode ser observado na figura que, acima de 70 UEs, o PAFS conseguiu superar os demais

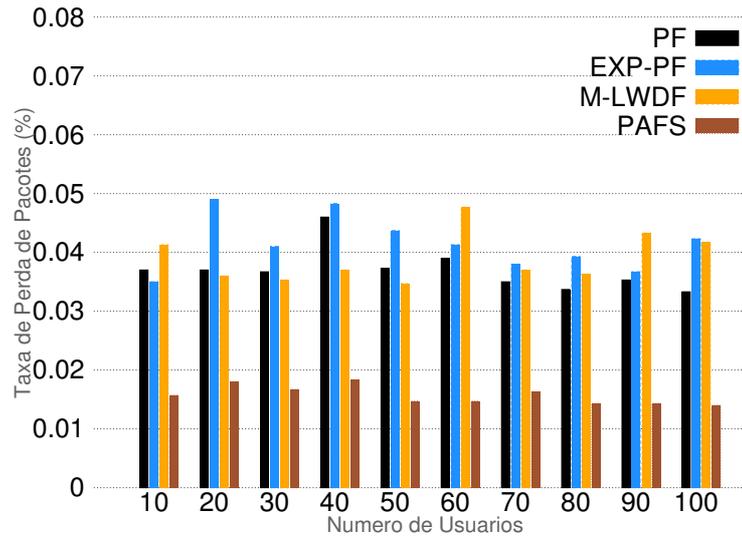


Figura 6.7: Taxa de perda de pacotes da transmissão de fluxos de VoIP.

escalonadores na métrica de atraso.

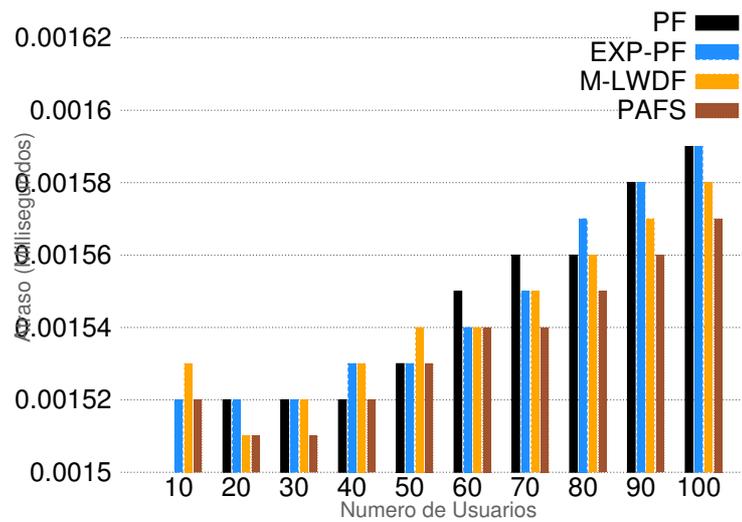


Figura 6.8: Atraso da transmissão de fluxos de VoIP.

Apesar de possuir menores taxas de *bits* do que as aplicações de vídeo, durante a transmissão de dados e voz nas redes LTE alguns usuários que estão em melhores condições de canal conseguem obter melhores taxas de transmissão de dados. Assim, é importante promover a justiça na utilização dos recursos de rádio a todos os usuários ativos no sistema através de mecanismos que distribuam de maneira mais igualitária os recursos disponíveis na rede. Os escalonadores de enlace de descida podem ser utilizados para melhorar essa distribuição mais justa entre os usuários, uma vez que, indicam quais os usuários terão acesso aos recursos de rádio disponíveis em cada intervalo de tempo.

Em relação à distribuição de recursos entre os usuários em função do aumento da quantidade dos usuários na célula, o PAFS apresentou valores similares aos demais escalonadores avaliados em todas as quantidades de UEs, conforme pode ser observado na Figura 6.9. Com quantidades inferiores a 20 UEs, o PAFS conseguiu um índice de justiça superior aos demais escalonadores.

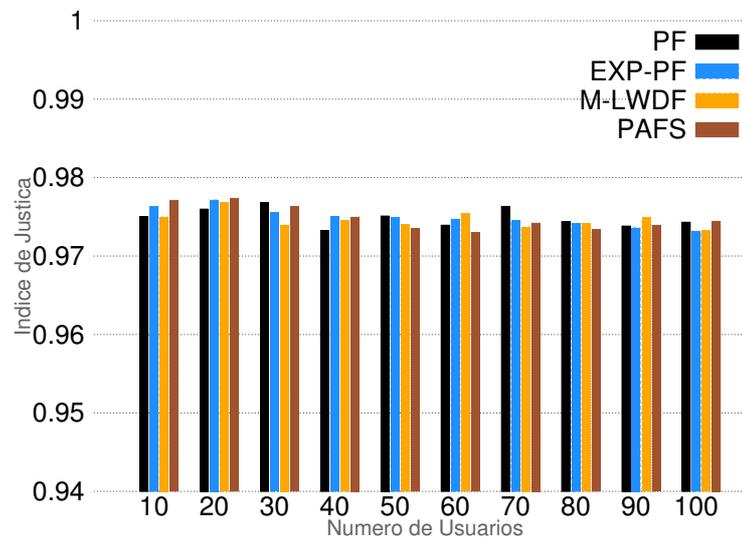


Figura 6.9: Índice de justiça da transmissão de fluxos de VoIP.

Conforme apresentado neste capítulo, o PAFS conseguiu o objetivo de melhorar a eficiência geral do sistema, aumentando a vazão e diminuindo as taxas de perda e atraso na maioria das situações. Mesmo com melhora no uso geral do sistema por parte dos usuários, o PAFS ainda conseguiu manter índice de justiça similar aos demais escalonadores analisados.

6.4 Considerações Finais

A eficiência do escalonador apresentado nesta dissertação pode ser observada quando seu desempenho é comparado aos escalonadores PF, M-LWDF e EXP-PF. Na maioria dos casos de fluxos de vídeo estudados, o escalonador proposto atingiu taxas de transmissão de dados maiores que os demais, como discutido nas Seções 6.2 e 6.3 deste capítulo.

Durante o experimento realizado com fluxos de vídeo, o PAFS apresentou melhorias em relação às métricas para a maioria das quantidades de UEs ativas avaliadas.

Por outro lado, nos fluxos de VoIP, devido à sua baixa taxa de *bit*, a vazão obtida no experimento apresentou níveis semelhantes aos dos demais escalonadores estudados. Para o atraso e a PLR, o PAFS, conseguiu uma considerável redução nos níveis em todas as comparações realizadas. O índice de justiça do PAFS, quando comparado com os outros escalonadores, conseguiu uma equidade semelhante às demais.

Diante do exposto neste capítulo, pode-se observar que o PAFS, conseguiu tratar de maneira eficiente as incertezas do meio sem fio. O escalonador proposto conseguiu priorizar os usuários com melhores condições de canal de forma eficiente e mantendo uma equidade no uso dos recursos por parte dos usuários.

7 Conclusão

Nesta dissertação é apresentado o PAFS (*Performance-Aware Fuzzy Scheduler*), um escalonador de enlace de descida para a camada MAC da rede LTE, desenvolvido com base na lógica nebulosa. O PAFS foi projetado para melhorar o vazão do sistema sem prejudicar a justiça na utilização dos recursos de rádio entre os usuários. A utilização da lógica nebulosa permite ao PAFS lidar com as incertezas relativas ao processo de escalonamento, e possibilita um desenvolvimento mais eficiente, baseado no uso de proposições e graus de verdade.

Testes de avaliação de desempenho foram realizados com o LTE-Sim, um simulador de redes LTE, desenvolvido para avaliar estratégias de escalonamento de enlace de subida e enlace de descida em ambientes com uma ou várias células (eNB) e multi-usuários. O simulador leva em consideração a mobilidade dos usuários, a otimização de recursos rádio, as técnicas de reuso de frequência, a modulação e codificação adaptativas, entre outros aspectos [Piro et al., 2011b]. Esses testes simularam o uso do PAFS em ambientes reais, com a transmissão de fluxos de dados de vídeo e VoIP.

Os resultados mostram que o escalonador proposto promove uma alocação adequada dos recursos de rádio, melhorando o desempenho de diferentes parâmetros de QoS, sem comprometer a equidade entre os usuários do sistema. A avaliação apresentada no Capítulo 6 mostra que o PAFS alcança uma maior taxa de transmissão no sistema LTE, reduzindo a taxa de perda de pacotes e o atraso, ao mesmo tempo em que mantém um valor aceitável para o índice de justiça entre todos os usuários.

Os resultados obtidos durante a realização deste trabalho estão sendo divulgados por meio das seguintes publicações:

- *A Performance-Aware Fuzzy Downlink Scheduler for LTE Networks*: artigo submetido ao Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos(SBRC) realizado em Belém – Pará no período de 15 a 19 de maio de 2017 e promovido pela Sociedade Brasileira de Computação (SBC);
- *Performance Evaluation of TCP, MR-UDP and SCTP Protocols in 4G LTE*

Environments: artigo submetido ao Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC) realizado em Belém – Pará no período de 15 a 19 de maio de 2017 e promovido pela Sociedade Brasileira de Computação (SBC).

7.1 Contribuições

Além do desenvolvimento de um novo escalonador de enlace de descida para as redes LTE, conforme apresentado no Capítulo 5, uma outra contribuição importante deste trabalho foi investigar a adequação do uso de lógica nebulosa para o processo de escalonamento. Isso pode servir de base para novos estudos que visam o desenvolvimento de algoritmos que tratem situações de priorização para o acesso a recursos rádio em redes sem fio móveis.

Outra contribuição importante é a disponibilização de um conjunto de curvas de BLER para um modelo de canal TU e uma largura de banda de 5 MHz, que podem ser usados por outros pesquisadores para modelar o canal de comunicação sem fio de sistemas LTE.

Diante do exposto, o PAFS contribuiu para lidar de forma eficiente com os problemas relacionados a esses meios que apresentam natureza com muitas instabilidades. Essa constatação é derivada da análise de métricas específicas da transmissão de serviços de vídeo e VoIP nas redes LTE, como a vazão total do sistema, o atraso fim-a-fim, a PLR e o índice de justiça de Jain [Jain et al., 1984].

7.2 Trabalhos Futuros

Além da arquitetura do PAFS implementada neste trabalho, pretende-se adicionar melhorias ao processo de escalonamento realizado pelo mecanismo nebuloso. Alguns deles são:

- Acréscimo de informações de entrada ao sistema nebuloso, como por exemplo a BLER (*Block Error Rate* – Taxa de Erro de Bloco), o que pode contribuir para aumentar a eficiência da solução proposta aqui;

-
- Aumento da quantidade de termos nas funções de pertinência nebulosas, tanto de entrada quanto de saída, visando melhorar a caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos;
 - Uso de outros tipos de aplicações, tais como melhor esforço e jogos que utilizam a rede mundial de computadores para avaliação;
 - Realização de simulações, comparando o uso do PAFS com outros escalonadores além dos apresentados nesta dissertação, e disponíveis atualmente na literatura;
 - Utilização de modelos de interferência co-canal.

Referências Bibliográficas

- [3GPP, 1999] 3GPP (1999). TR25.942. Technical Specification Group, Radio Access Network, 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Disponível em: ftp://www.3gpp.org/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_05/Docs/Pdfs/rp-99440.pdf. Acesso: 30-05-2016.
- [3GPP, 2001] 3GPP (2001). Cellular Text Telephone Modem; Minimum Performance Specification (Release 4). Technical Specification Group Services and System Aspects. Disponível em: ftp://www.3gpp.org/tsg_sa/TSG_SA/TSGS_11/Docs/PDF/SP-010092.pdf. Acesso: 31-05-2016.
- [3GPP, 2006] 3GPP (2006). 3GPP TS 34.121 V6.4.0 (2006-03). Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Terminal conformance specification, Radio transmission and reception (FDD), 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Disponível em: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/134100_134199/134121/06.04.00_60/ts_134121v060400p.pdf. Acesso: 31-05-2016.
- [3GPP, 2010] 3GPP (2010). 3GPP TR 36.814 V9.0.0 (2010-03). 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects. Disponível em: <http://www.qtc.jp/3GPP/Specs/36814-900.pdf>. Acesso: 31-05-2016.
- [3GPP, 2015a] 3GPP (2015a). LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Physical Layer Procedures. 3GPP TS 36.213 version 12.7.0 Release 12. Disponível em: <http://www.3gpp.org/DynaReport/36213.htm>. Acesso: 31-05-2016.
- [3GPP, 2015b] 3GPP (2015b). LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1 general aspects and principles. 3GPP TS 36.410 version 12.1.0 Release 13. Disponível em: <http://www.3gpp.org/DynaReport/36410.htm>. Acesso: 26-05-2016.

- [3GPP, 2015c] 3GPP (2015c). LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); X2 general aspects and principles. 3GPP TS 36.420 version 12.1.0 Release 13. Disponível em: <http://www.3gpp.org/DynaReport/36420.htm>. Acesso: 26-05-2016.
- [3GPP, 2016] 3GPP (2016). 3GPP TR 25.943 V13.0.0.0 (2016-02). Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Deployment aspects, 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Disponível em: http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/125900_125999/125943/13.00.00_60/tr_125943v130000p.pdf. Acesso: 30-05-2016.
- [3GPP, 2016] 3GPP (2016). 3rd Generation Partnership Project (3GPP) Website. Disponível em: <http://www.3gpp.org/>. Acesso: 20-01-2016.
- [Abrahão, 2015] Abrahão, D. (2015). Alocação de Blocos de Recursos em Redes LTE Utilizando Lógica Fuzzy e Estimação Adaptativa de Banda Efetiva. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica (EEEC), Goiânia, Goiás.
- [Albuquerque, 2013] Albuquerque, E. (2013). *Qualidade de Serviço em Redes de Computadores*. Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier, 1ª edição.
- [Astudillo et al., 2014] Astudillo, C. A., Borin, J. F., & Fonseca, N. L. S. (2014). Impacto de Critérios de Projeto de Escalonadores LTE Uplink na Qualidade de Serviço. *XXXII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*.
- [Avramova et al., 2013] Avramova, A. P., Yan, Y., & Dittmann, L. (2013). Evaluation of a Cross Layer Scheduling Algorithm for LTE Downlink. *Telfor Journal*, 5(1), 26–31.
- [Bai et al., 2006] Bai, Y., Zhuang, H., & Wang, D. (2006). *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*. Springer.
- [Basukala et al., 2009] Basukala, R., Ramli, H. A. M., & Sandrasegaran, K. (2009). Performance analysis of EXP/PF and M-LWDF in downlink 3GPP LTE system. *First Asian Himalayas International Conference on Internet (AH-ICI 2009)*, (pp. 1–5).
- [Bello Filho, 2014] Bello Filho, C. A. L. (2014). Análise de desempenho do protocolo TCP em Redes LTE. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

- [Belluci, 2014] Belluci, D. P. (2014). *Sistemas Baseados em Regras Fuzzy e Aplicações*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal do ABC, Santo André, São Paulo.
- [Biondi Neto et al., 2006] Biondi Neto, L., Coelho, P. H. G., Amaral, J. L. M., & Mello, M. H. C. S. (2006). Minicurso de Sistema Especialista Nebuloso. *XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*.
- [Bormann et al., 2001] Bormann, C., Burmeister, C., Degermark, M., Fukushima, H., Hannu, H., Jonsson, L.-E., Hakenberg, R., Koren, T., Le, K., Liu, Z., Martensson, A., Miyazaki, A., Svanbro, K., Wiebke, T., & Yoshimura, T. and Zheng, H. (2001). RObust Header Compression (ROHC). RFC 3095, Network Working Group. Disponível em: <https://tools.ietf.org/html/rfc3095>. Acesso: 01-05-2016.
- [Brehm & Prakash, 2013] Brehm, M. & Prakash, R. (2013). Overload-state downlink resource allocation in LTE MAC layer. *Wireless Networks*, 19(5), 913–931.
- [Capozzi et al., 2013] Capozzi, F., Piro, G., Grieco, L. A., Boggia, G., & Camarda, P. (2013). Downlink Packet Scheduling in LTE Cellular Networks: Key Design Issues and a Survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 15(2), 678–700.
- [Cardoso et al., 2015] Cardoso, E. H. S., Silva, C. P. A., Monteiro, F. P., & Francês, C. R. L. (2015). Análise de Desempenho de Algoritmos de Escalonamento de Recursos em Redes LTE Heterogêneas. *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*.
- [Cardoso et al., 2011] Cardoso, F. A. C. M., Manzan Júnior, D., Vilela, R. M., & Figueiredo, F. L. (2011). Tecnologias de Camada Física e MAC para redes LTE. *Cad. CPqD Tecnologia*, 7(1), 7–22.
- [Cavalcanti et al., 2012] Cavalcanti, J. H. F., Cavalcanti, M. T., Souto, C. R., & Melo, H. (2012). *Lógica Fuzzy Aplicada às Engenharias*.
- [Cortes, 2004] Cortes, O. A. C. (2004). Integração Entre Lógica Nebulosa e Algoritmos Evolutivos. *INFOCOMP Journal of Computer Science*, 3(1).
- [Dahlman et al., 2010] Dahlman, E., Parkvall, S., Skold, J., & Beming, P. (2010). *3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband*. 3G Evolution Series. Elsevier Science.

- [Ferdosian et al., 2015a] Ferdosian, N., Othman, M., Ali, B. M., & Lun, K. Y. (2015a). Greedy–Knapsack algorithm for optimal downlink resource allocation in LTE networks. *Wireless Networks*, (pp. 1–14).
- [Ferdosian et al., 2015b] Ferdosian, N., Othman, M., Ali, B. M., & Lun, K. Y. (2015b). Throughput-aware Resource Allocation for QoS Classes in LTE Networks. *International Conference on Computer Science and Computational Intelligence (ICCSCI 2015)*.
- [Ferreira, 2015] Ferreira, M. V. G. (2015). Alocação de Blocos de Recursos em Redes LTE Utilizando Estimativa de Limitante de Retardo Através de Cálculo de Rede. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás.
- [Franco, 2013] Franco, C. A. S. (2013). Performance of Video Services in LTE System Using Relay. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- [Ghosh et al., 2010] Ghosh, A., Ratasuk, R., Mondal, B., Mangalvedhe, N., & Thomas, T. (2010). LTE-advanced: next-generation wireless broadband technology. *IEEE Wireless Communications*, 17(3), 10–22.
- [Giupponi & Perez-Neira, 2008] Giupponi, L. & Perez-Neira, A. I. (2008). Fuzzy-based Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks. In *3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom 2008)* (pp. 1–6).
- [Gonçalves, 2011] Gonçalves, J. F. E. A. C. (2011). Análise de Desempenho dos Sistemas LTE e LTE-Advanced com base em Simuladores. Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computadores, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- [HSPA, 2015] HSPA (2015). The Mobile Broadband HSPA Standard. Disponível em: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/99-hspa>. Acesso: 02-12-2015.
- [Jain et al., 1984] Jain, R., M., D., Chiu, M., & Hawe, W. R. (1984). A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer System. *Digital Equipment Corporation*.

- [Jané, 2004] Jané, D. A. (2004). Uma introdução ao estudo da lógica *fuzzy*. *Hórus*, 2, 1–16.
- [Kela et al., 2008] Kela, P., Puttonen, J., Kolehmainen, N., Ristaniemi, T., Henttonen, T., & Moision, M. (2008). Dynamic packet scheduling performance in UTRA Long Term Evolution downlink. In *3rd International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC 2008)* (pp. 308–313).
- [Khan et al., 2013] Khan, N., Martini, M. G., & Staehle, D. (2013). Opportunistic QoS-Aware Fair Downlink Scheduling for Delay Sensitive Applications using Fuzzy Reactive and Proactive Controllers. *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2013 IEEE 78th*, (pp. 1–6).
- [Klir & Yuan, 1995] Klir, G. J. & Yuan, B. (1995). *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. New Jersey: Prentice Hall.
- [Kuo, 2013] Kuo, Y. (2013). Minimizing Power Consumption in LTE Data Scheduling with the Constraints of Channel Condition and QoS. Dissertação de Mestrado, Institute of Computer Science and Engineering, College of Computer Science, National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan.
- [Liang & Mendel, 2000] Liang, Q. & Mendel, J. M. (2000). Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and desig. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 8(5).
- [Luo et al., 2010] Luo, H., Ci, S., Wu, D., Wu, J., & Tang, H. (2010). Quality-driven cross-layer optimized video delivery over LTE. *IEEE Communications Magazine*, 48(2), 102–109.
- [Maia et al., 2014] Maia, A. M., Castro, M. F., Vieira, D., & Ghamri-Doudane, Y. (2014). Um Mecanismo para Escalonamento de Pacotes no Uplink da Rede LTE no Contexto da Comunicação Máquina-a-Máquina. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*.
- [Martin, 2009] Martin, S. (2009). *Beyond 3G – Bringing Networks, Terminals and the Web Together – LTE, WiMAX, IMS, 4G Devices and the Mobile Web 2.0*. John Wiley & Sons.

- [Martins et al., 2014] Martins, M. S. A., Pereira, W. C., Caldeira Júnior, R. S. M., & Neto, A. P. (2014). Redes Neurais Artificiais Aplicadas na Predição de Algoritmos de Escalonamento em Sistemas LTE. *III Workshop Ciência, Tecnologia e Arte da Amazônia*.
- [Matos et al., 2012] Matos, J. G., Junior, J. P. M., Junior, J. A. M. S., & Neto, A. (2012). Avaliação da Qualidade de Vídeo e VoIP em Sistema LTE com diferentes Algoritmos de Escalonamento utilizando Métricas de QoS. *XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrT*, (pp. 13–16).
- [Mehlführer et al., 2011] Mehlführer, C., Colom Ikuno, J., Šimko, M., Schwarz, S., Wrulich, M., & Rupp, M. (2011). The Vienna LTE simulators - Enabling reproducibility in wireless communications research. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2011(1), 1–14.
- [Nasralla & Martini, 2013] Nasralla, M. M. & Martini, M. G. (2013). A Downlink Scheduling Approach for Balancing QoS in LTE Wireless Networks. *24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications: MAC and Cross-Layer Design Track*.
- [Peterson & Davie, 2013] Peterson, L. L. & Davie, B. (2013). *Redes de Computadores – Uma Abordagem de Sistemas*. Campus, 5^a edição.
- [Piro et al., 2011a] Piro, G., Baldo, N., & Miozzo, M. (2011a). An LTE Module for the Ns-3 Network Simulator. In *Proceedings of the 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques, SIMUTools '11* (pp. 415–422).
- [Piro et al., 2011b] Piro, G., Grieco, L. A., Boggia, G., Capozzi, F., & Camarda, P. (2011b). Simulating LTE Cellular Systems: An Open-Source Framework. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(2).
- [Piro et al., 2011c] Piro, G., Grieco, L. A., Boggia, G., Fortuna, R., & Camarda, P. (2011c). Two-Level Downlink Scheduling for Real-Time Multimedia Services in LTE Networks. *IEEE Transactions on Multimedia*, 13(5), 1052–1065.
- [Riedi et al., 1999] Riedi, R. H., Crouse, M. S., Ribeiro, V. J., & Baraniuk, R. (1999). A Multifractal Wavelet Model with Application to Network Traffic. *IEEE Transactions on Information Theory*.

- [Rodriguez & Guardieiro, 2015] Rodriguez, P. F. & Guardieiro, P. R. (2015). Um Novo Algoritmo de Escalonamento Downlink para Redes LTE. *XIII Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (XIII CELL)*.
- [Santos & Mello, 2010] Santos, D. & Mello, L. A. R. S. (2010). Planejamento de Cobertura e Capacidade de Redes de Acesso em Banda Larga com Tecnologia LTE. *Monographs in Computer Science*.
- [Sesia et al., 2011] Sesia, S., Toufik, I., & Baker, M. (2011). *LTE – The UMTS Long Term Evolution – From Theory to Practice*. John Wiley & Sons, 2ª edição.
- [Souza & Guardieiro, 2012] Souza, T. B. & Guardieiro, P. R. (2012). Qualidade de Serviço em Redes Móveis de 4ª Geração LTE. *Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica*.
- [Sulthana & Nakkeeran, 2014] Sulthana, S. F. & Nakkeeran, R. (2014). Study of Downlink Scheduling Algorithms in LTE Networks. *Journal of Networks*, 9.
- [Swetha et al., 2013] Swetha, Mohankumar, N. M., & Devaraju, J. T. (2013). Performance Evaluation of Round Robin and Proportional Fair Scheduling Algorithms for Constant Bit Rate Traffic in LTE. *IRACST – International Journal of Computer Networks and Wireless Communications*, 3(1).
- [UMTS, 2015] UMTS (2015). The Mobile Broadband UMTS Standard. Disponível em: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/103-umts>. Acesso: 02-12-2015.
- [Zadeh, 1965] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, Vol. 8, 338–353.
- [Zadeh, 1996] Zadeh, L. A. (1996). Fuzzy logic – computing with words. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 4(2), 103–111.
- [Zhou et al., 2013] Zhou, D., Song, W., Baldo, N., & Miozzo, M. (2013). Evaluation of TCP performance with LTE downlink schedulers in a vehicular environment. In *9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC 2013)* (pp. 1064–1069).
- [Zhu & Yang, 2015] Zhu, R. & Yang, J. (2015). Buffer-aware adaptive resource allocation scheme in LTE transmission systems. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015(1), 1–16.