



JAHYR GONÇALVES NETO

ALGORITMO CUSTOMIZÁVEL POR HIERARQUIA PARA AGENDAMENTO DE TRÁFEGO
DE DADOS EM REDES *LONG TERM EVOLUTION* (LTE)

CAMPINAS
2014



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

JAHYR GONÇALVES NETO

ALGORITMO CUSTOMIZÁVEL POR HIERARQUIA PARA AGENDAMENTO DE TRÁFEGO
DE DADOS EM REDES *LONG TERM EVOLUTION* (LTE)

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

Supervisor/Orientador: PROF. DR. MAX HENRIQUE MACHADO COSTA

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO JAHYR
GONÇALVES NETO, E ORIENTADA PELO PROF. DR.
MAX HENRIQUE MACHADO COSTA.

CAMPINAS
2014

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

G586a Gonçalves Neto, Jahyr, 1980-
Algoritmo customizável por hierarquia para agendamento de tráfego de dados em redes Long Term Evolution (LTE) / Jahyr Gonçalves Neto. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Max Henrique Machado Costa.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Otimização. 2. Análise multicritério. 3. Tomada de decisões. I. Costa, Max Henrique Machado, 1950-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Titulo em outro idioma: Customizable algorithm by hierarchy for data traffic scheduling in Long Term Evolution networks

Palavras-chave em inglês:

Optimization

Multicriteria analysis

Decision-making

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Max Henrique Machado Costa [Orientador]

Fabbryccio Akkazzha Chaves Machado Cardoso

Maria Cristina Felippetto de Castro

Dalton Soares Arantes

Paulo Cardieri

Data de defesa: 12-12-2014

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

Candidato: Jahyr Gonçalves Neto

Data da Defesa: 12 de dezembro de 2014

Título da Tese: "Algoritmo Customizado de Agendamento para Tráfego de Dados em Redes Long Term Evolution (LTE) com Priorização de Vídeo "

Prof. Dr. Max Henrique Machado Costa (Presidente): _____

Profa. Dra. Maria Cristina Felippetto de Castro: _____

Dr. Fabbryccio Akkazzha Chaves Machado Cardoso: _____

Prof. Dr. Dalton Soares Arantes: _____

Prof. Dr. Paulo Cardieri: _____

ERRATA DO TÍTULO:

"Algoritmo Customizável por Hierarquia para Agendamento de Tráfego de Dados em Redes *Long Term Evolution* (LTE)".

Prof. Dr. Pedro Luis Dias Feres
Coordenador de Pós-Graduação
FEEC/UNICAMP
Matrícula: 24541-1

RESUMO

Long Term Evolution (LTE), um padrão desenvolvido pelo 3rd *Generation Partnership Project* (3GPP), é atualmente a principal tecnologia 4G, provendo convergência tecnológica para esta geração de sistemas de comunicação celular. As redes LTE prometem velocidades de transmissão de dados em torno de 100 Mbps no canal de descida. Para esta alta taxa de transferência de dados é necessário otimizar o uso dos recursos de rede. A tecnologia LTE utiliza técnicas de agendamento para a alocação de recursos de rádio com base nas condições do canal de comunicação. Este trabalho apresenta um algoritmo customizável para agendamento de dados multi-usuário no canal de descida das redes LTE que pode priorizar diferentes tipos de serviços selecionados. O esquema de agendamento proposto é uma versão modificada do agendador *Proportional Fairness*, que usa a técnica *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Isto permite agregar critérios de desempenho para melhorar a alocação de recursos com base nas condições de tráfego gerais e um conjunto de prioridades de serviços predefinidos. A abordagem para essa customização é atribuir pesos para determinados parâmetros utilizados no processo de alocação de recursos, modificando assim a importância relativa desses parâmetros, criando uma hierarquia de critérios. É possível ainda adicionar critérios para diferentes tipos de dados através de matrizes de comparação. A matriz de comparação quantifica o julgamento do tomador de decisão no que se refere à importância relativa dos diferentes critérios. Assim, o agendador pode se tornar flexível e adaptável a diferentes cenários de tráfego. Exemplos são apresentados onde o tráfego de vídeo é priorizado.

Palavras Chave: *Agendamento; Tomada de decisão multicritério; Long Term Evolution (LTE); Analytic Hierarchy Process (AHP); Proportional Fairness, Round Robin, Best CQI, Channel Quality Indicator (CQI), Opportunistic Scheduling.*

ABSTRACT

Long Term Evolution (LTE), a standard developed by the 3rd Generation Partnership Project (3GPP), is currently the 4G mainstream technology, providing technology convergence for this generation of cellular communication systems. LTE networks promise data transmission rates of 100 Mbps in the downlink channel. For this high throughput it needs to optimize the use of network resources. LTE uses scheduling techniques for radio resource allocation based on communication channel conditions. This paper presents a customizable algorithm for multi-user data scheduling in the LTE downlink channel that can prioritize selected types of services. The proposed scheduling scheme is a modified version of the proportional fairness scheduler that uses Analytic Hierarchy Process (AHP) techniques. This allows to aggregate performance criteria to improve resource allocation based on general traffic conditions and a set of predefined service priorities. The approach for this customization is to assign weights to certain parameters used in the resource allocation process, thus modifying the relative importance of these parameters and creating a hierarchy of criteria. It is possible to add criteria for different types of data through comparison matrices. A comparison matrix quantifies the judgement of the decision maker with respect to the relative importance of different criteria. Thus the scheduler can be made flexible and adaptive to different traffic scenarios. Examples are given where video traffic is prioritized.

Keywords: *Scheduling; Multicriteria decision making; Long Term Evolution (LTE); Analytic Hierarchy Process (AHP); Proportional Fairness, Round Robin, Best CQI, Channel Quality Indicator (CQI), Opportunistic Scheduling.*

SUMÁRIO

Capítulo 1

| | |
|---|-----------|
| INTRODUÇÃO | 1 |
| CONCEITOS PRELIMINARES..... | 7 |
| 2.1 CONCEITOS BÁSICOS | 7 |
| 2.1.1 Transmissão do Sinal | 7 |
| 2.1.2 Recepção do Sinal | 8 |
| 2.1.3 Estimação de Canal | 9 |
| 2.1.4 Técnicas de Acesso Múltiplo | 10 |
| 2.1.5 Os modos FDD e TDD | 11 |
| 2.1.6 Técnica OFDMA | 12 |
| 2.2 SISTEMA LTE..... | 15 |
| 2.2.1 O Núcleo da Rede | 16 |
| 2.2.2 A rede de acesso | 17 |
| 2.2.3 Agendamento | 18 |
| 2.2.4 Considerações Gerais para Estratégias de Alocação de Recursos | 19 |
| 2.2.5 Algoritmos de Agendamento..... | 20 |
| 2.2.6 Considerações para Agendamento de Recursos em Redes LTE | 21 |
| 2.2.7 Adaptação de Enlace..... | 22 |
| 2.3 TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO | 23 |
| 2.3.1 Análise de Decisão | 23 |
| 2.3.2 Usos e Aplicações do método AHP | 24 |
| MÉTODO PROPOSTO DE ESCALONAMENTO | 26 |
| 3.1 DESCRIÇÃO PROCEDURAL DO ALGORITMO..... | 26 |
| 3.1.2 Diagrama de blocos..... | 27 |
| 3.2 Algoritmo proposto: Agendador Customizável | 28 |
| 3.2.1 Estudo de Caso 1 | 28 |
| 3.2.2 Estudo de Caso 2 | 31 |
| 3.3 Consistência da Matriz de Comparação | 33 |
| 3.3.1 Consistência do Estudo de Caso 1 | 34 |
| 3.3.2 Consistência do Estudo de Caso 2 | 36 |
| 3.3.2.1 Solução proposta para Estudo de Caso 2: | 37 |
| MODELO SISTÊMICO..... | 40 |
| 4.1 CONSIDERAÇÕES SISTÊMICAS | 40 |
| 4.2 CONFIGURAÇÃO DA REDE | 42 |
| 4.3 MODELO DE TRÁFEGO | 43 |
| RESULTADOS..... | 45 |
| 5.1 Cenário 1: Estudo de Caso 1 | 45 |
| 5.2 Cenário 2: Estudo de Caso 2 | 51 |
| 5.3 Cenário 3: Solução do Estudo de Caso 2..... | 53 |
| CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 59 |
| REFERÊNCIAS | 61 |

*À Tatiane Carla de Azevedo, que me ajudou
a crescer de inúmeras formas, tornando os desafios
muito mais fáceis de serem vencidos, estando
sempre a meu lado, nos bons e maus momentos.*

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço especialmente aos meus pais, Jair Gonçalves Junior e Ana Maria Martinelli Gonçalves e a minha irmã Letícia Martinelli Gonçalves, sem o apoio deles não teria conseguido ultrapassar todos os obstáculos que a vida nos impõe.

Também agradeço especialmente ao meu orientador, Prof Dr. Max Henrique Machado Costa, que além do seu apoio profissional, competente e aplicado, também me ofereceu a sua amizade atenciosa e compreensiva.

Agradeço a meus avós Jahyr Gonçalves, Ana Lourdes Martinelli e Afonso Martinelli (*in memoriam*) pelos ensinamentos durante toda a vida, a minha noiva Tatiane Carla de Azevedo pelo seu carinho, afeto, compreensão e paciência e à minha tia Cássia Denise Gonçalves pelas longas conversas e pelos anos de convivência. Em especial, agradeço minha avó Floripes Jorge Gonçalves (*in memoriam*), pelos ótimos anos de convivência e pelos exercícios de fixação de todas as tardes.

Agradeço aos amigos de trabalho do Coml@b e da UNIFEV pelo companheirismo, orientação, apoio e compreensão.

Agradeço a toda comunidade da FEEC e da Unicamp.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Centro Universitário de Votuporanga pelo apoio financeiro.

Lista de Ilustrações

| | |
|--|----|
| Fig. 1 - Conceito Básico da Rede LTE e terminologia..... | 04 |
| Fig. 2 - Esquemas de modulação utilizados pela tecnologia LTE..... | 08 |
| Fig. 3 – Arquitetura do receptor sem fio..... | 09 |
| Fig. 4 - Técnicas de múltiplo acesso..... | 10 |
| Fig. 5 – Modos TDD e FDD..... | 12 |
| Fig. 6 - Grade de recursos de rádio para múltiplo acesso..... | 13 |
| Fig. 7 - Diagrama de blocos das técnicas OFDMA e SC-FDMA..... | 15 |
| Fig. 8 - Diagrama de blocos para os procedimentos do método AHP..... | 27 |
| Fig. 9 – Estrutura do problema de decisão com os pesos..... | 30 |
| Fig. 10 – Posições das eNodeBs e dos usuários..... | 42 |
| Fig. 11 – Cenário 1: Alocação de blocos utilizando o Agendador Customizável..... | 46 |
| Fig. 12 - Cenário 1: Alocação de blocos utilizando o agendador <i>Proportional Fairness</i> | 47 |
| Fig. 13 - Cenário 1: Comparação entre AC e PF para o usuário de vídeo..... | 48 |
| Fig. 14 – Cenário 1: BLER do Agendador Customizável..... | 49 |
| Fig. 15 – Cenário 1: BLER do Agendador <i>Proportional Fairness</i> | 49 |
| Fig. 16 – Cenário 1: Comparação da BLER entre AC e PF..... | 50 |
| Fig. 17 – Cenário 1: BLER Total da célula..... | 50 |
| Fig. 18 – Cenário 1: Comparação de vazão de dados..... | 51 |
| Fig. 19 - Cenário 2: Alocação de blocos utilizando o Agendador Customizável..... | 52 |
| Fig. 20 - Cenário 2: Alocação de blocos com o Agendador <i>Proportional Fairness</i> | 52 |
| Fig. 21 - Cenário 2: Comparação entre AC e PF para um usuário de vídeo..... | 53 |
| Fig. 22 - Cenário 3: Alocação de blocos utilizando o Agendador Customizável..... | 54 |
| Fig. 23 - Cenário 3: Alocação de blocos utilizando agendador <i>Proportional Fairness</i> | 55 |
| Fig. 24 - Cenário 3: Comparação entre AC e PF para um usuário de vídeo..... | 55 |
| Fig. 25 – Cenário 3: Comparação entre as curvas do Agendador Customizável para o caso 2 e sua solução..... | 56 |
| Fig. 26 – Cenário 3: BLER do Agendador Customizável..... | 56 |
| Fig. 27 – Cenário 3: BLER do Agendador <i>Proportional Fairness</i> | 57 |
| Fig. 28 – Cenário 3: Comparação da BLER entre AC e PF..... | 57 |
| Fig. 29 - Cenário 3: BLER Total da célula..... | 58 |
| Fig. 30 – Cenário 3: Comparação de vazão de dados..... | 58 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| 1. Características Gerais do LTE..... | 02 |
| 2. Parâmetros da simulação..... | 41 |
| 3. Parâmetros do tráfego de <i>streaming</i> de vídeo..... | 42 |

Lista de abreviaturas e acrônimos

| | |
|--------|--|
| 3GPP | <i>(3rd Generation Partnership Project)</i> |
| 16 QAM | <i>(16 Quadrature Amplitude Modulation)</i> |
| 64 QAM | <i>(64 Quadrature Amplitude Modulation)</i> |
| AC | <i>(Agendador Customizável)</i> |
| AHP | <i>(Analytic Hierarchy Processes)</i> |
| AMC | <i>(Adaptative Modulation and Coding)</i> |
| BC | <i>(Best CQI)</i> |
| BLER | <i>(Block Error Rate)</i> |
| BSPK | <i>(Binary phase shift keying)</i> |
| CDMA | <i>(Code Division Multiple Access)</i> |
| CI | <i>(Índice de Consistência)</i> |
| CR | <i>(Região de Consistência)</i> |
| CSI | <i>(Channel State Information)</i> |
| E-SMLC | <i>(Evolved Serving Mobile Location Centre)</i> |
| EPC | <i>(Evolved Packet Core)</i> |
| EPS | <i>(Evolved Packet System)</i> |
| FDD | <i>(Frequency Division Duplex)</i> |
| FDMA | <i>(Frequency Division Multiple Access)</i> |
| GSM | <i>(Global System for Mobile Communications)</i> |
| HARQ | <i>(Hybrid Automatic Repeat reQuest).</i> |
| HSS | <i>(Home Subscriber Server)</i> |
| HSDPA | <i>(High Speed Downlink Packet Access)</i> |
| HSUPA | <i>(High Speed Uplink Packet Access)</i> |
| IFFT | <i>(Inverse Fast Fourier Transform)</i> |
| ITU | <i>(International Telecommunication Union)</i> |
| LTE | <i>(Long Term Evolution)</i> |
| MCS | <i>(Modulation and Coding Scheme)</i> |
| MGLC | <i>(Mobile Gateway Location Centre)</i> |
| MIMO | <i>(Multiple Input Multiple Output)</i> |
| MME | <i>(Mobility Management Entity)</i> |

| | |
|---------|--|
| NAS | <i>(Non-Access Stratum)</i> |
| OFDMA | <i>(Orthogonal Frequency Division Multiple Access)</i> |
| OFDM | <i>(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)</i> |
| P-GW | <i>(PDN Gateway)</i> |
| PAPR | <i>(Peak-to-average power ratio)</i> |
| PCEF | <i>(Policy Control Enforcement Function)</i> |
| PCRF | <i>(Policy Control and Charging Rules Function)</i> |
| PDN | <i>(Packet Data Network)</i> |
| PF | <i>(Proportional Fairness)</i> |
| QAM | <i>(Quadrature Amplitude Modulation)</i> |
| QoS | <i>(Quality of Service)</i> |
| QPSK | <i>(Quadrature Phase-Shift Keying)</i> |
| RAN | <i>(Radio Access Network)</i> |
| RI | <i>(Consistência Aleatória)</i> |
| ROI | <i>(Region of Interest)</i> |
| RR | <i>(Round Robin)</i> |
| S-GW | <i>(Serving Gateway)</i> |
| SAE | <i>(System Architecture Evolution)</i> |
| SC-FDMA | <i>(Single-Carrier Frequency Division Multiple Access)</i> |
| SISO | <i>(Single Input Single Output)</i> |
| SINR | <i>(Signal to Interference plus noise Ratio)</i> |
| SMS | <i>(Short Message Service)</i> |
| TDMA | <i>(Time Division Multiple Access)</i> |
| TDD | <i>(Time Division Duplex)</i> |
| TFT | <i>(Traffic Flow Templates)</i> |
| TTI | <i>(Time Transmission Interval)</i> |

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Mesmo sem atender a todos os requisitos da ITU (*International Telecommunication Union*) para ser considerada uma rede celular de quarta geração, a tecnologia LTE (*Long Term Evolution*) [1] é popularmente chamada de tecnologia 4G [2]. Alguns autores tendem a ser mais precisos e a classificam como tecnologia 3.9G. Importante é considerar que LTE é uma tecnologia IP (*Internet Protocol*) móvel cuidadosamente projetada para oferecer baixa latência e elevada eficiência espectral se comparada com outras tecnologias de terceira geração.

A tecnologia LTE de acesso sem fio é baseada na técnica de multiplexação por divisão em frequências ortogonais (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – OFDM) [3], que permite melhorias significativas na alocação de recursos de rádio e adaptação dos enlaces.

A multiplexação OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) é uma variação do OFDM, que é utilizada no canal de descida do LTE. Esta técnica possibilita o múltiplo acesso no OFDM em ambos os domínios da frequência e do tempo. São definidos grupos de subportadoras contíguas que podem ser alocadas para diferentes usuários, ao longo de certo número de símbolos. Na tecnologia LTE, esse grupo é constituído por 12 subportadoras ao longo de 14 símbolos OFDM, no caso de prefixo cíclico normal, ou de 12 símbolos no caso de prefixo cíclico estendido. Desta forma, o OFDMA possibilita o agendamento de usuários em um *grid* tempo – frequência constituída por blocos de recursos (*Resource Blocks* – RB) de 1 milissegundo por 180 kHz. Os blocos de recursos são também referenciados como blocos de alocação. Devido à disponibilidade de sinais de referência nos blocos de alocação, o usuário pode medir a qualidade do canal e realimentar o agendador (escalador) na estação rádio base. Assim, é possível otimizar a alocação de usuários nos blocos de alocação conforme a qualidade de canal percebida pelos mesmos. Isto oferece alto ganho de vazão (*throughput*) no enlace de descida devido à diversidade de usuários [4]. No canal de subida, a tecnologia LTE utiliza o esquema de transmissão SC-FDMA (*Single-Carrier Frequency Division Multiple Access*). Esta é uma estratégia que sacrifica a eficiência espectral do OFDM em favor de uma melhor PAPR (*Peak-to-*

average power ratio), beneficiando o terminal móvel em termos de diminuição do consumo de bateria [5].

Além disso, com uma arquitetura de rede mais simples e de baixo custo, a tecnologia LTE provê não apenas uma conexão mais rápida, mas também uma variedade de novas aplicações disponíveis anteriormente apenas por meio de acessos de banda larga com fio a Internet.

Um exemplo de tais aplicações é a navegação em sites com conteúdo de vídeo embutidos em páginas da Internet. Mais do que uma tendência, este tipo de conteúdo causa um tráfego de dados muito maior nas redes de acesso de banda larga com fio, e é inevitável que o mesmo aconteça em redes celulares móveis [2].

Prevendo essa demanda crescente por taxa de dados, Internet móvel e serviços interativos, como por exemplo, VoIP (*Voice Over IP*), *streaming* de vídeo e jogos *on-line*, a tecnologia LTE foi incluída no mapa de evolução do 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) para garantir a competitividade dos operadores 3G e permitir um caminho de atualização para as redes atuais.

A Tabela 1 apresenta as características principais da tecnologia LTE [6].

Tabela 1: Características Gerais do LTE

| Parâmetro | Detalhes de Padrão |
|--|---|
| Taxa de bit de pico DL 64QAM (Mbit/s) em 20MHz | 100(SISO), 150 (2x2 MIMO), 300 (4x4 MIMO) |
| Taxa de bit de pico UL (Mbit/s) em 20MHz | 25 (QPSK), 50 (16QAM), 75 (64QAM) |
| Tipo de dados | Somente comutação por pacotes |
| Largura de banda (MHz) | 1,4; 3; 5; 10; 15 e 20. |
| Duplexação | FDD ou TDD |
| Mobilidade | 0-15 km/h (otimizado) 15-120 km/h (alto desempenho) |
| Latência | Ocioso para ativo <~ 100 ms ~ 10 ms para pacotes de dados |
| Eficiência espectral | Canal de descida: 3 – 4 x Rel 6 HSDPA Canal de subida: 2 – 3 x Rel 6 HSUPA |
| Múltiplo acesso | OFDMA (Canal de descida) SC-FDMA (canal de subida) |
| Tipos de modulação | QPSK, 16 QAM, 64 QAM (canal de subida e canal de descida) |

O objetivo inicial de taxa de bits para o sistema foi de 100 Mbit/s no canal de descida e de 50 Mbit/s no canal de subida, o que pode ser alcançado pelo sistema quando se opera com uma única antena SISO (*Single Input Single Output*) e largura de banda de 20 MHz. Para larguras de banda mais estreitas, as taxas de bits correspondentes podem ser calculadas a partir do escalonamento adequado da taxa de bits de 20 MHz. Portanto, independentemente da largura de banda, a eficiência espectral do SISIO é de 5 bit /s/Hz no canal de descida e 2,5 bit /s/Hz no canal de subida.

A especificação da latência na rede de acesso foi dividida nos planos de usuário e de controle para possibilitar sua otimização. No plano de usuário, a latência é definida pelo tempo necessário para transmitir um pacote IP do terminal móvel até o nó de borda da rede de acesso por rádio (*Radio Access Network* - RAN) ou vice-versa. O requisito de latência nesse plano estabelece que o tempo de ida do pacote não deve exceder 5 ms em uma rede não carregada. O tempo de ida e volta do pacote possui limite de 10 ms. No plano de controle, o requisito de latência é definido pelo tempo de transição do terminal de usuário entre o estado inativo e o estado ativo. Esta latência na transição de estados do terminal não deve exceder 100 ms para a tecnologia LTE.

A especificação do sistema foi feita de forma a se obter o máximo desempenho para velocidades de usuário de até 15 km/h. Uma pequena degradação de desempenho é permitida para velocidades superiores. Porém, para velocidades de até 120 km/h o sistema deve prover alto desempenho, sem perda de conexão ao longo da rede. Considerando o lado da infraestrutura, além de possuir uma arquitetura de rede simplificada e de baixo custo, um dos méritos da tecnologia LTE é a flexibilidade no uso do espectro, que permite a implantação da rede de acordo com a disponibilidade do espectro. Uma rede pode ser implantada para operar com larguras de banda desde 1,4 MHz até 20 MHz em várias faixas de frequências distintas, por exemplo, em 450 MHz, 700 MHz, 800 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz, 2600 MHz, entre outras. O presente trabalho utiliza nas simulações uma largura de banda de 5MHz, o que permite a alocação de 25 blocos de alocação a cada 1ms. A tecnologia LTE também foi especificada para atuar em uma grande variedade de faixas de frequência. Ademais, as redes LTE são o início do próximo sistema de redes móveis chamado *LTE Advanced*, considerado mais do que um sistema evolucionário 3G [7]. Esta nova tecnologia promete velocidades superiores a 1 Gbps no canal de descida.

A arquitetura do sistema LTE consiste de estações rádio base, chamadas *eNodeBs*, posicionadas entre o usuário e o núcleo da rede como mostra a Fig 1. Todas as funções de gerenciamento de alocação de recursos de rádio (*Radio Resource Allocation* - RRA) são realizadas nas *eNodeBs*.

O esquema RRA adaptativo atribui os recursos de rádio do sistema (subportadora, capacidade e taxa de bits) como uma função do tráfego de carga, condição do canal, disponibilidade de informação de canal e requisitos de qualidade de serviço do usuário (*Quality of Service* - QoS) [8].

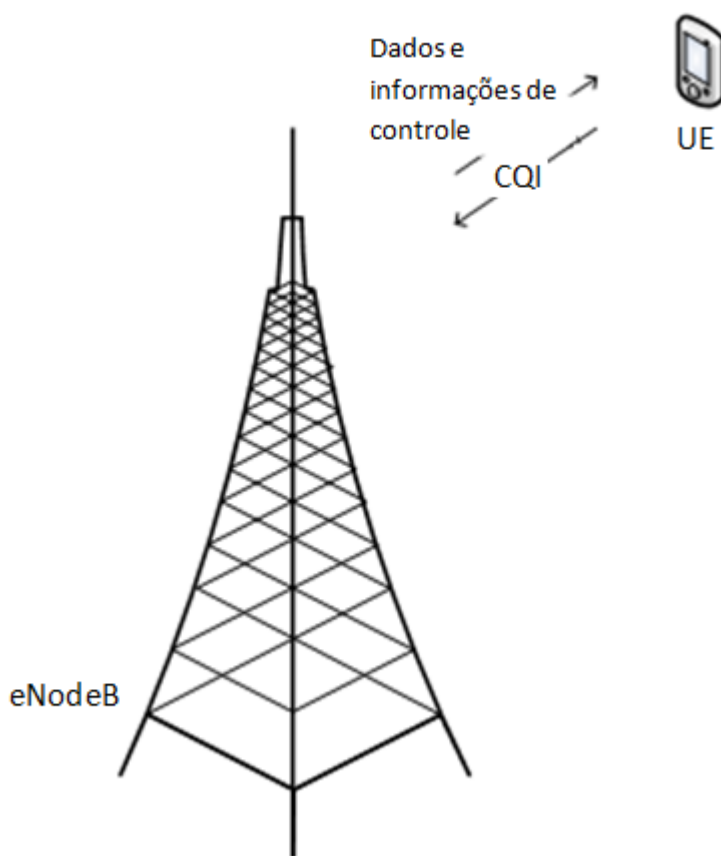


Fig. 1 - Conceito Básico da Rede LTE e terminologia.

O agendamento de usuários é baseado na qualidade do canal e provê alocação de recursos de rádio disponíveis. O agendamento é feito baseado nos algoritmos de agendamento. A *eNodeB* é responsável pela seleção inteligente de usuários e pelas transmissões de seus pacotes para que os recursos de rádio sejam eficientemente utilizados e a qualidade do serviço do usuários seja satisfeita. Alguns dos serviços que devem ser suportados no sistema LTE são VoIP (*Voice over IP*), *online gaming* e *streaming* de vídeo [9].

No entanto, os requisitos para a operação do sistema LTE são diferentes de outros sistemas de comunicação sem fio. Assim, a adequação de algumas técnicas para uso no sistema LTE requer uma investigação mais aprofundada [10]. Além disso, não há padronização específica para o escalonador e a implementação fica a critério do provedor de serviços de rede [11].

Assim, este trabalho propõe um esquema de agendamento adaptativo que pode ser customizado pela operadora conforme a demanda por serviços de tráfego de rede. O escopo do trabalho é canal de descida das redes LTE, onde os serviços de dados podem ser especialmente tratados para evitar congestionamentos de rede. O desenvolvimento é baseado em customização do algoritmo *Proportional Fairness*.

Por meio do uso do método de tomada de decisão multicritério denominado Processo Analítico Hierárquico (*Analytic Hierarchy Processes* - AHP) [12], é possível agregar critérios de desempenho aos parâmetros do algoritmo, como por exemplo, indicador de qualidade do canal de comunicação dos usuários (*Channel Quality Indicator* - CQI), ou histórico de dados recebidos pelo usuário ou mesmo a taxa de dados atingíveis pelos usuários. Estas variáveis são normalmente utilizadas nos cálculos para alocação de recursos de rádio para usuários em uma comparação de diferentes algoritmos de agendamento. A principal ideia do método AHP é seleccionar pesos relativos que descrevem a importância relativa de cada critério, classificando as alternativas de decisão. Isso é feito a partir do uso de matrizes de comparação par-a-par, o que permite modificar a alocação recursos entre um conjunto de alternativas. O esquema proposto é projetado para ter desempenho similar ao algoritmo *Proportional Fairness* em um cenário onde as tomadas de decisões multicritério não forem respeitadas, ou seja em um cenário onde os parâmetros das matrizes de comparação são todos iguais a um.

Alguns trabalhos relacionados podem ser destacados. Em [13] um estudo para implementação e cálculos de alocação de recursos para tráfego de dados misto é apresentado. Em [14] alguns cenários são propostos para avaliar a performance de rede. Em [15] uma célula é isolada para análise da rede LTE. Em [16] a capacidade dos sistemas de agendamento multiusuário é analisada. Em [17], é utilizado o método de decisão multicritério AHP no balanceamento de carga para evitar o congestionamento dos serviços mistos de *unicast* e *multicast* nas redes LTE. A proposta consiste em minimizar os recursos de rádio exigidos quando ocorre carga máxima da célula. A técnica AHP é utilizada para calcular o peso dos recursos de rádio exigidos. Em [18] é proposto um algoritmo de agendamento para redes LTE que leva em

consideração a qualidade do canal e o tipo de tráfego para a alocação de recursos de rádio. A partir de uma classificação inicial do tráfego em tempo real e tempo não real, usuários de áudio e vídeo são adicionados a uma lista de priorização. O algoritmo atribui blocos de recursos para os usuários considerando a ordem desta lista.

O presente trabalho é organizado como se segue:

O capítulo 2 apresenta conceitos preliminares relativos à tecnologia LTE. O capítulo 3 faz uma descrição detalhada do método proposto de escalonamento do sistema. O quarto capítulo trata do modelo sistêmico, enquanto que o quinto capítulo apresenta os resultados das simulações dos agendadores Customizável e *Proportional Fairness*. Por fim, o capítulo 6 completa a tese com conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

CONCEITOS PRELIMINARES

Esta seção apresenta conceitos teóricos para o entendimento da tecnologia LTE.

2.1 CONCEITOS BÁSICOS

2.1.1 Transmissão do Sinal

Em transmissões sem fio (*wireless*) existem diferentes tipos de esquemas de modulação. Os principais são BSPK (*Binary Phase Shift Keying*), QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), 16 QAM (*16 Quadrature Amplitude Modulation*) e 64 QAM (*64 Quadrature Amplitude Modulation*) [19].

Em um esquema de transmissão sem fio, o transmissor recebe um fluxo de bits da aplicação de *software* e o computa em símbolos. Os símbolos correspondem bits que representam a amplitude e fase. Estas informações são codificadas em uma onda chamada portadora para serem transmitidos.

O esquema de modulação QPSK transmite as informações usando a onda de rádio, que pode ter quatro estados diferentes. Estes estados podem ter fases de 45° , 135° , 225° , e 315° , que correspondem às combinações de bits de 00, 10, 11 e 01 respectivamente. É possível representar os quatro estados do QPSK usando um diagrama de constelação.

No diagrama, a distância de cada estado da origem representa a amplitude da onda transmitida, enquanto o ângulo (medido no sentido anti-horário a partir do eixo x) representa a fase.

A tecnologia LTE usa os quatro esquemas de modulação apresentados na Fig. 2. A modulação BPSK envia um bit por vez, usando dois estados que podem ser interpretados como fases iniciais de 0° e 180° , ou amplitudes de +1 e -1. A tecnologia LTE usa este esquema para um controle de fluxo, mas não usa para transmissão de dados. A modulação 16-QAM envia quatro bits por vez, usando dezesseis estados que possuem amplitudes e fases diferentes. De forma

similar, a modulação 64-QAM envia seis bits por vez, usando sessenta e quatro estados diferentes, tendo uma taxa de dados seis vezes maior que a modulação BPSK [19].

2.1.2 Recepção do Sinal

O receptor tem que lidar com os problemas de propagação que o sinal de rádio enfrenta durante seu percurso[19]. Na recepção, se o ruído e a interferência foram grandes, então os bits podem ser interpretados de forma errada, ou seja, um bit 1 pode ser interpretado como 0 e vice versa, levando a erros de bits no receptor. A taxa de erro depende do SINR (*Signal to Interference Plus Noise Ratio*) no receptor. Em esquemas de modulação como a 64-QAM, o sinal pode ser transmitido de maneiras diferentes, usando os estados no diagrama de constelação que são empacotados em conjunto.

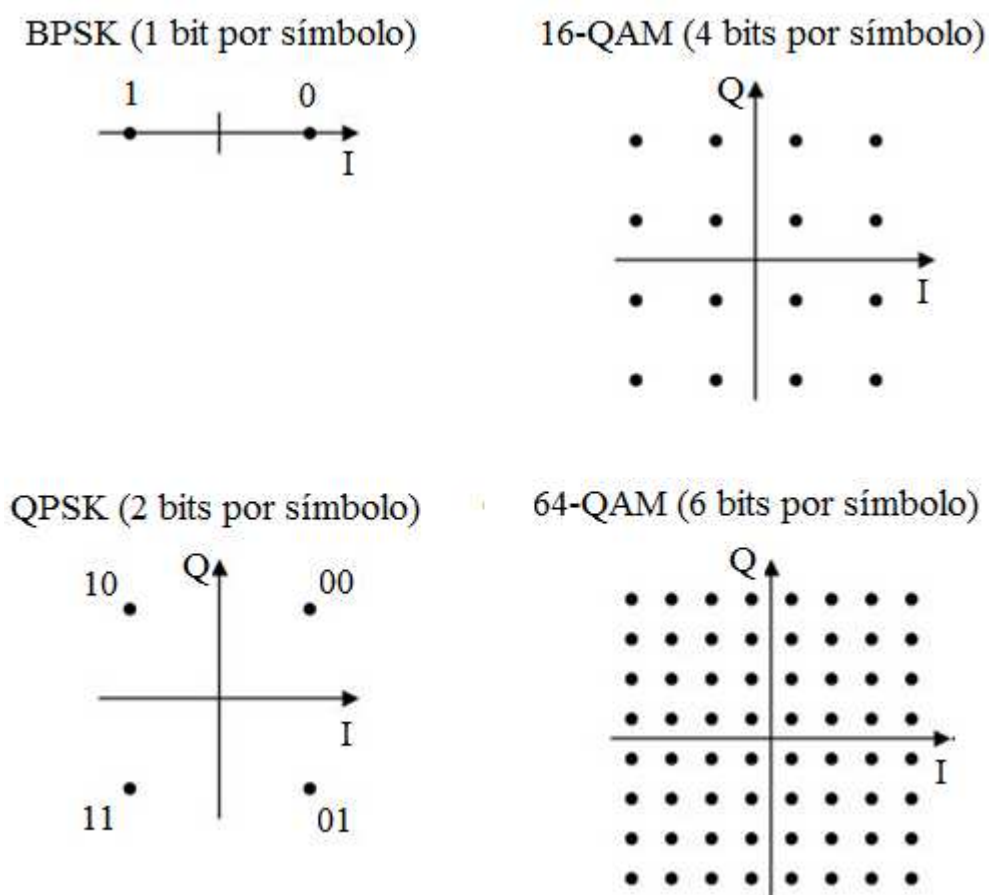


Fig. 2 - Esquemas de modulação utilizados pela tecnologia LTE.

Fonte: COX, 2012

Como resultado, a modulação 64-QAM se torna vulnerável a erros e pode apenas ser usada se a SINR for alta. Em contraste, a modulação QPSK possui poucos e bem distribuído estados apenas, portanto é menos vulnerável a erros e pode ser usada com sucesso em situações de baixa SINR. A tecnologia LTE explora isso alternando dinamicamente entre esquemas de modulação diferentes: usa a modulação 64-QAM em situações de alta SINR para prover alta taxa de dados, e diminui para as modulações 16-QAM ou QPSK para reduzir o número de erros.

2.1.3 Estimação de Canal

A fase do sinal recebido não depende só da fase do sinal transmitido, mas também da posição exata do receptor. Se, por exemplo, o receptor se move em metade do comprimento de onda da portadora, a fase do sinal recebido se altera em 180° . Na modulação QPSK, esta mudança de fase transforma pares de bits 00 em 11 e vice-versa, degradando completamente a informação recebida. Para lidar com este problema, o transmissor insere símbolos de referência dentro do fluxo de dados, os quais possuem amplitude e fase pré-definidas. No receptor, uma função de estimação de canal mede os símbolos de referência, comparando-os com os transmitidos e estima o deslocamento de fase que a interface aérea introduziu. É possível remover esta mudança de fase dos símbolos de informação e recuperar os bits de informação.

A arquitetura do receptor pode ser vista na Fig. 3.

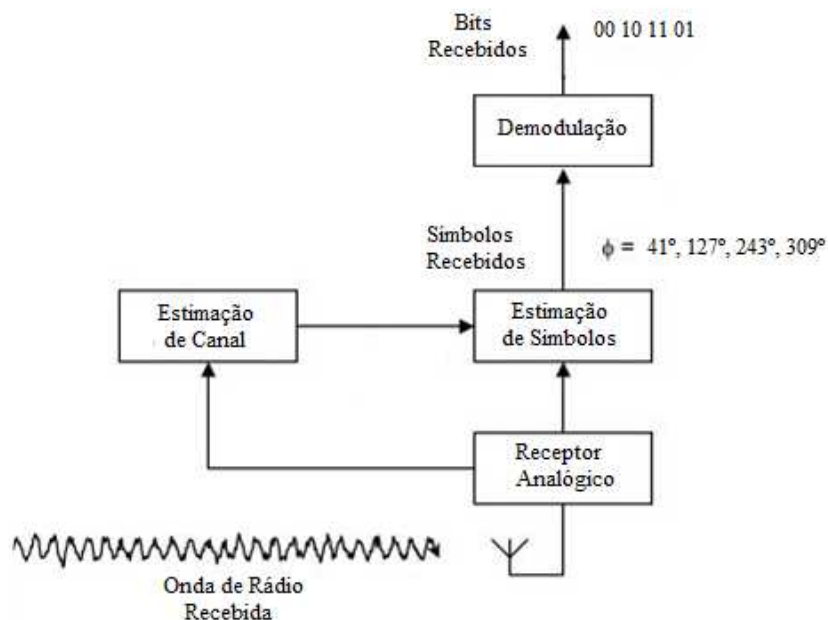


Fig. 3 – Arquitetura do receptor sem fio.
Fonte: COX, 2012

O sinal de entrada chega com um ângulo de fase diferente. No entanto, o estimador de canal detecta esta mudança de fase, permitindo ao receptor reconstruir os bits transmitidos da mesma maneira que antes. A mudança de fase não varia muito de um símbolo para o próximo, de modo que os símbolos de referência só precisam ocupar uma parte pequena do fluxo de dados transmitidos. A sobrecarga (*overhead*) causada pelos símbolos de referência no LTE é de cerca de 10% [19].

2.1.4 Técnicas de Acesso Múltiplo

Em uma rede celular, a estação rádio base transmite para vários celulares ao mesmo tempo. Esta comunicação é possível através do compartilhamento dos recursos da interface aérea, com uma técnica conhecida como acesso múltiplo. Os sistemas de comunicações móveis utilizam duas técnicas de acesso múltiplo diferentes: FDMA (*Frequency division multiple access*) e TDMA (*Time division multiple access*). Os esquemas de compartilhamento podem ser vistos na Fig. 4. A multiplexação FDMA foi usada pelos sistemas analógicos de primeira geração. Nesta técnica, cada equipamento móvel recebe o sinal em sua própria frequência de portadora, utilizando filtros analógicos. As portadoras são separadas por bandas de guarda que não são utilizadas, minimizando a interferência entre elas. Na técnica TDMA, os terminais móveis recebem as informações na mesma frequência, mas em intervalos de tempo diferentes.

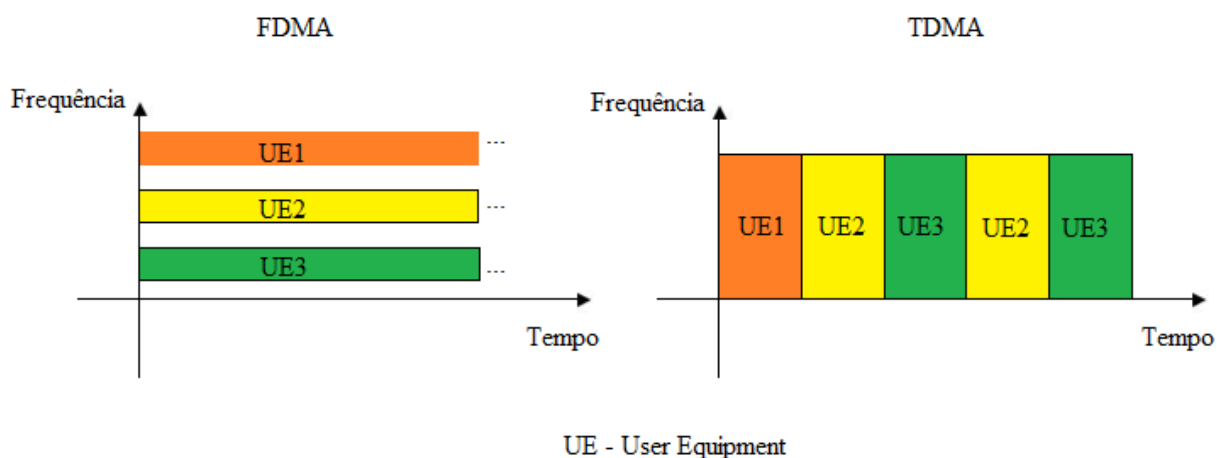


Fig. 4 - Técnicas de múltiplo acesso.

A tecnologia GSM usa uma combinação das técnicas FDMA e TDMA, para compartilhar as várias frequências portadoras entre grupos de oito celulares diferentes em cada célula. O LTE utiliza outra técnica mista (OFDMA),

Os sistemas de comunicação de terceira geração usam uma técnica completamente diferente, conhecido como CDMA (*Code Division Multiple Access*). Nesta técnica, os celulares recebem os dados na mesma frequência da portadora e ao mesmo tempo, mas os sinais são rotulados pela utilização de códigos, que permitem que um dispositivo móvel separe o seu próprio sinal do sinal dos outros. A tecnologia LTE utiliza alguns dos conceitos da técnica CDMA para alguns sinais de controle apenas.

Técnicas de acesso múltiplo são variações de uma técnica mais simples conhecida como multiplexação. A diferença é que em um sistema de acesso múltiplo é possível alterar dinamicamente a alocação de recursos para diferentes celulares, enquanto que em um sistema de multiplexação, a alocação de recursos é fixa.

2.1.5 Os modos FDD e TDD

Ao utilizar as técnicas de acesso múltiplo FDMA e TDMA, uma estação rádio base pode separar as transmissões entre os celulares individuais na célula. A interface aérea deve separar as transmissões das estações rádio base das transmissões dos celulares, para garantir que não haja interferência. Para isso, um sistema de comunicação móvel pode operar nos modos de transmissão FDD (*Frequency division duplex*) e TDD (*Time division duplex*), como pode ser visto na Fig. 5. Ao utilizar o modo FDD, as estações rádio base transmitem em uma frequência portadora, e os celulares em outra. Quando se utiliza o modo TDD, a estação rádio base e o equipamento do usuário (UE) transmitem na mesma frequência da portadora, mas em intervalos de tempo diferentes.

No modo FDD, as larguras de banda do canal de subida e canal de descida são fixas e geralmente iguais. Isto o torna adequado para comunicações de voz, em que as taxas de dados dos dois canais são muito semelhantes. No modo TDD, o sistema pode ajustar a quantidade de tempo que é atribuída ao canal de subida e canal de descida. Isto faz com que seja adequado para aplicações tal como navegação na Internet, na qual a taxa de dados de canal de descida pode ser muito maior do que a taxa de canal de subida.

O modo TDD pode ser afetado por interferência se, por exemplo, uma estação rádio base estiver transmitindo enquanto uma estação rádio base vizinha está recebendo. Para evitar isto, as estações rádio base vizinhas devem ser cuidadosamente sincronizadas e devem usar as mesmas atribuições de tempo para o canal de subida e o canal de descida, de modo que possam transmitir e receber ao mesmo tempo.

Quando se opera no modo FDD, o terminal móvel geralmente contém um filtro que isola o transmissor do canal de subida do receptor de canal de descida. Em uma variação conhecida como modo FDD *half-duplex*, uma estação rádio base pode ainda transmitir e receber ao mesmo tempo, mas um dispositivo móvel só pode fazer um ou o outro. Isto significa que o terminal móvel não precisa isolar o transmissor do receptor, o que facilita a o projeto e a implementação do *hardware* de rádio.

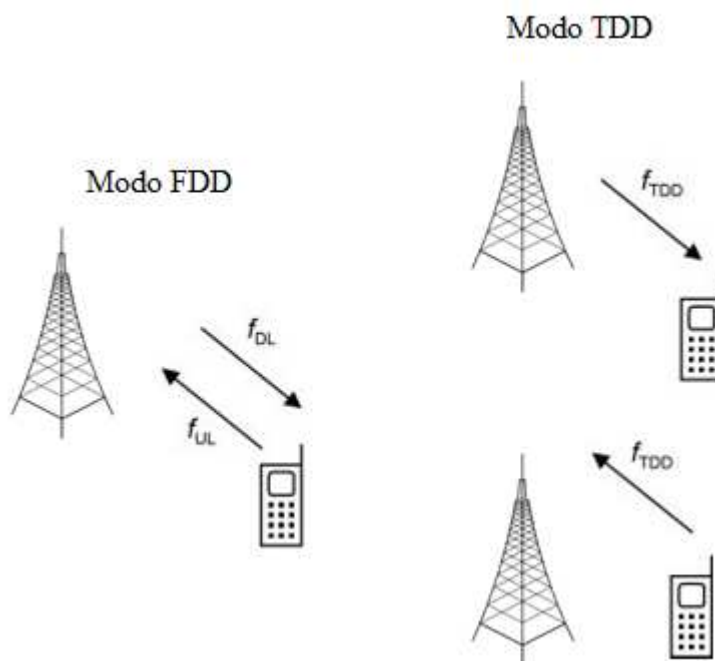


Fig. 5 – Modos TDD e FDD.

A tecnologia LTE suporta tanto o modo FDD como o modo TDD [21].

2.1.6 Técnica OFDMA

A multiplexação OFDM é o núcleo da tecnologia LTE na camada física e foi escolhida devido aos vários benefícios que oferece enquanto técnica de multiplicação. O uso de múltiplas

portadoras, por exemplo, possibilita organizar e configurar os recursos de rádio a partir de uma grade tempo-frequência, conforme mostra a Fig. 6, provendo maior flexibilidade aos algoritmos de controle do enlace e de alocação de recursos. A tecnologia LTE utiliza um grande número de subportadoras, até o limite de mil e duzentas [6].

Além disso, por utilizar portadoras ortogonais, permite que haja sobreposição entre portadoras vizinhas sem interferência mútua. Isto torna eficiente o uso do espectro de frequências por múltiplas portadoras. Outro benefício da multiplexação OFDM é a possibilidade de gerar um sinal banda larga de alta taxa de dados a partir de múltiplos sinais banda estreita de baixa taxa. Neste caso, o efeito do canal de transmissão pode ser compensado em cada subportadora por meio de um ganho de amplitude e uma rotação de fase. Esta abordagem da multiplexação OFDM provê grande robustez aos múltiplos percursos do canal de transmissão e reduz a complexidade da estimação e da equalização de canal.

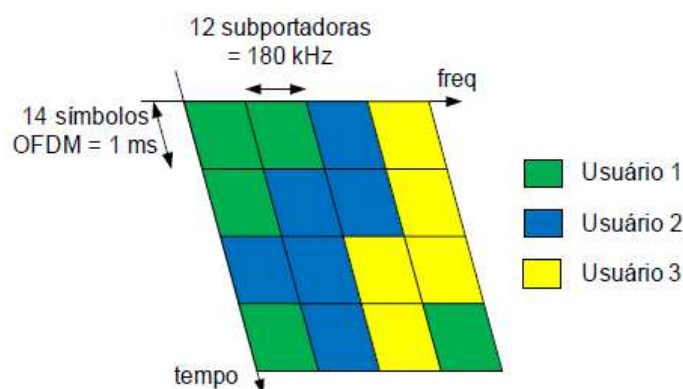


Fig. 6 - Grade de recursos de rádio para múltiplo acesso.

Adicionalmente, a multiplexação OFDM tem a vantagem de ser implementada no domínio digital a partir da técnica Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT), que é um algoritmo rápido, de baixa complexidade e largamente difundido.

O termo OFDMA advém da possibilidade de se realizar o múltiplo acesso a partir das portadoras no domínio da frequência. Na tecnologia LTE, o termo é empregado para indicar o múltiplo acesso de usuários a recursos na frequência e ao longo do tempo por meio de símbolos OFDM. Ao contrário de enviar as informações como um fluxo de dados único, um transmissor OFDM divide a informação em vários fluxos menores paralelos, e envia cada um destes fluxos em uma frequência diferente, em múltiplas portadoras. Se a taxa total de dados permanece a

mesma, então a taxa de dados para cada subportadora é menor, de modo que a duração do símbolo é mais longa. Isto reduz a quantidade de interferência intersímbolos, e consequentemente reduz a taxa de erro. Este mecanismo da técnica OFDMA é bastante flexível e permite configurar a taxa de codificação e o esquema de modulação por usuário, bem como por recurso de rádio.

A estação rádio base pode combater problemas de desvanecimento, alocando subportadoras nas quais o terminal móvel está recebendo um sinal forte, e mudando a alocação com base nas alterações no padrão do desvanecimento. De um modo semelhante, pode transmitir para outro terminal móvel utilizando dois blocos separados de subportadoras. Ao alocar subportadoras em resposta a mudanças nos padrões de desvanecimento, um transmissor OFDMA pode reduzir significativamente o impacto deste problema [19].

A técnica de múltiplo acesso OFDMA é o esquema de modulação utilizado no enlace de descida, enquanto a técnica de múltiplo acesso SC-FDMA (*Single-Carrier Frequency Division Multiple Access*), é utilizado no enlace de subida.

A técnica SC-FDMA pode ser vista como uma versão pré-codificada da técnica OFDMA, em que cada símbolo é inicialmente espalhado na frequência por meio de uma FFT antes de ser enviado para o modulador OFDM. [22]. Os componentes funcionais das técnicas OFDMA/SCFDMA para o transmissor são apresentados na Fig. 7 e consistem nos seguintes módulos:

1. O módulo de conversão serial para paralelo (S/P): utilizado para demultiplexar um fluxo de dados de alta taxa em n fluxos de baixa taxa.
2. O módulo de pré-codificação FFT, empregado apenas no SC-FDMA, é utilizado para espalhar na frequência as informações dos símbolos modulados em portadora única.
3. O módulo de mapeamento para subportadoras realiza a transformação dos bits de dados para os recursos de rádio. Os fluxos de baixa taxa de dados, provenientes do conversor S/P, são mapeados para subportadoras e símbolos OFDM, de acordo com a regra de múltiplo acesso. Nesse ponto, também são adicionadas portadoras de referência que são utilizadas pelos algoritmos de estimação de canal, codificação MIMO e equalização.
4. Os módulos Transformada Rápida de Fourier Inversa (*Inverse Fast Fourier Transform* - IFFT), Paralelo para Serial (P/S) e Prefixo Cíclico (PC) são responsáveis pela geração dos símbolos OFDM no tempo. Os sinais das múltiplas portadoras são convertidos para o domínio do tempo para transmissão. Por último, é adicionado um intervalo de guarda

baseado na extensão cíclica do sinal no tempo (PC), com o objetivo de evitar a interferência intersímbolos.

Na recepção, ocorrem as operações duais das operações realizadas durante a transmissão. Além disso, módulos adicionais são necessários para compensar as degradações geradas pelo canal de transmissão. As técnicas OFDMA e SC-FDMA perdem desempenho quando há desvios de frequência nas subportadoras, gerados tipicamente por instabilidades do oscilador local ou por efeito Doppler [23]. Esses efeitos destroem a ortogonalidade do OFDM, gerando interferências entre portadoras e interferências de múltiplo acesso [24]. No enlace de subida, o problema é agravado porque essas imperfeições ocorrem de forma diferente para cada usuário, dificultando a sincronização [25].

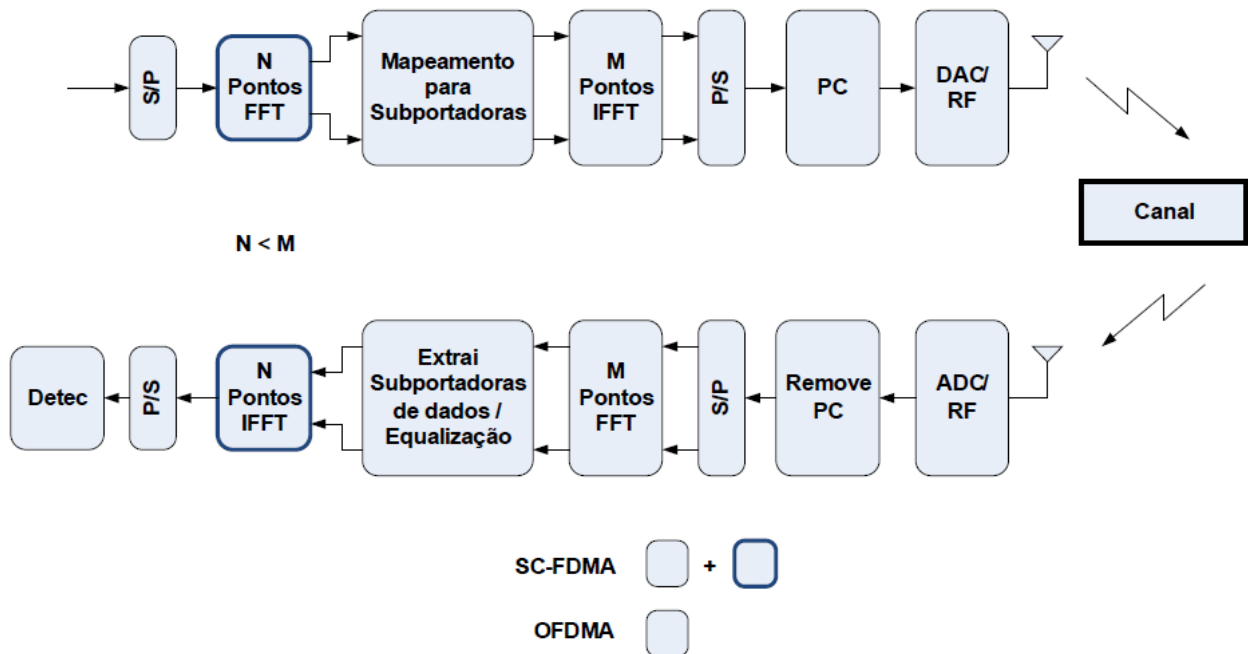


Fig. 7 - Diagrama de blocos das técnicas OFDMA e SC-FDMA.

2.2 SISTEMA LTE

Em uma rede LTE, com base na informação de qualidade do canal, que indica a condição instantânea de comunicação do usuário, é possível configurar o nível de modulação, a taxa de codificação e o esquema de codificação MIMO (*Multiple Input / Multiple Output*). Os algoritmos

de agendamento e de controle adaptativo de camada de enlace operam em conjunto para otimizar a vazão de dados da célula e do usuário.

2.2.1 O Núcleo da Rede

A tecnologia LTE foi projetada para suportar apenas transmissões por pacotes utilizando o protocolo IP (*Internet Protocol*), estabelecendo comunicação entre o equipamento do usuário (UE) e o núcleo da rede. O termo LTE engloba a evolução do acesso via rádio. A evolução de outros aspectos é conhecida como *System Architecture Evolution* (SAE), que inclui o núcleo da rede (*Evolved Packet Core* - EPC). A junção das tecnologias LTE e SAE constitui o *Evolved Packet System* (EPS). O sistema EPS usa o conceito de *bearers* para rotear o tráfego para o equipamento do usuário. Um *bearer* é um fluxo de pacotes IP com QoS definida. O núcleo EPC é responsável pelo controle global dos UEs e para o estabelecimento dos *bearers*. Os nós lógicos do EPS são [20].

- *PDN Gateway* (P-GW): responsável pela atribuição de endereços IP para o UE, bem como pela filtragem dos pacotes IP do usuário no canal de descida em diferentes *bearers*, tendo como referência o QoS. Isto é executado com base em *Traffic Flow Templates* (TFTs);
- *Serving Gateway* (S-GW): todos os pacotes IP do usuário são transferidos pelo S-GW, que garante a mobilidade para os *bearers* de dados quando o UE se move entre *eNodeBs*. Provê também funções administrativas na rede visitada, como por exemplo, a coleta de informações para a cobrança;
- *Mobility Management Entity* (MME): O MME é o nó de controle que processa a sinalização entre o UE e o SAE. Os protocolos que são executados entre o UE e a SAE são conhecidos como protocolos *Non-Access Stratum* (NAS). As principais funções são relacionadas com a gestão de *bearers*, com a gestão de conexão e com a interoperabilidade com outras redes. A primeira inclui o estabelecimento, manutenção e liberação dos *bearers*, a segunda inclui o estabelecimento e segurança da conexão entre a rede e o UE e a terceira inclui entrega de chamadas de voz para redes legadas, respectivamente;
- *Evolved Serving Mobile Location Centre* (E-SMLC): administra os recursos necessários para encontrar a localização de um UE;

- *Mobile Gateway Location Centre* (GMLC): O GMLC contém funcionalidades necessárias para suportar o serviço de localização.
- *Home Subscriber Server* (HSS): contém os dados de assinatura SAE dos usuários, como por exemplo, restrições de acesso para *roaming*. Ele também contém informações sobre a *Packet Data Network* (PDN) a qual o usuário pode se conectar. Além disso, o HSS mantém informações dinâmicas, tais como a identidade do MME ao qual o usuário está atualmente ligado ou registrado;
- *Policy Control and Charging Rules Function* (PCRF): responsável pela política de controle de tomada de decisão e por funcionalidades de tarifação na *Policy Control Enforcement Function* (PCEF). A PCEF garante que o fluxo de dados será tratado de acordo com o perfil de assinatura do usuário.

2.2.2 A Rede de Acesso

A rede de acesso LTE consiste em várias *eNodeBs* interligadas entre si por meio de uma interface X2. Para o tráfego normal do usuário não há um controlador centralizado, portanto a arquitetura é dita ser plana. A evolução LTE é responsável por todas as funções relacionadas com rádio, que podem ser resumidas como:

- **Gestão de Recursos de Rádio:** abrange todas as funções relacionadas com os *bearers* de rádio, tais como o controle de rádio, de admissão de rádio, de mobilidade de rádio, agendamento e alocação dinâmica de recursos.
- **Compressão de cabeçalho:** Ajuda a garantir o uso eficiente do espectro fazendo a compressão dos cabeçalhos dos pacotes IP que poderiam representar sobrecarga, especialmente em aplicações com pacotes de tamanho pequeno.
- **Segurança:** Todas as informações enviadas por meio da interface de rádio são criptografadas.
- **Posicionamento:** O LTE fornece as medições necessárias para a localização exata de todos os UE.
- **Conectividade com o EPC.** Consiste na sinalização para o MME e o caminho do *bearer* para o S-GW.

Todas estas funções residem nas *eNodeBs*, que podem ser responsáveis pela gestão de várias células. A evolução LTE executa a função de controlador de rádio para a *eNodeB* reduzindo a latência e melhorando a eficiência, uma vez que permite uma interação próxima entre as diferentes camadas de protocolo da rede de acesso de rádio. A rede LTE não suporta *soft handover*, portanto, não há necessidade de uma função de combinação de dados centralizada na rede. Isto reflete na transferência de todas as informações relacionadas com o UE conforme este se desloca.

2.2.3 Agendamento

Em um sistema LTE as *eNodeBs* são responsáveis por gerenciar o agendamento de recursos para os canais de subida e descida, suportando tantos usuários no sistema quanto possível, levando em conta as exigências de QoS das respectivas aplicações.

O objetivo de um algoritmo de agendamento de recursos na *eNodeB* é alocar os blocos de recursos e a potência de transmissão para cada *subframe*, visando otimizar um conjunto de métricas de desempenho, como por exemplo vazão média, atraso e eficiência espectral total por usuário. No canal de descida, a estratégia de alocação de recursos é limitada pela potência de transmissão total da *eNodeB*, enquanto que no canal de subida, as principais restrições de potência de transmissão em diferentes blocos de recursos surgem da interferência entre as células e da potência dos UEs.

Conforme comentado no Capítulo 1, os usuários das redes LTE são agendados para trafegar dados através dos algoritmos de agendamento. Portanto, a principal tarefa de um agendador é alocar pares de blocos de alocação de rádio (1 ms e 12 subportadoras) de forma inteligente para diferentes usuários, de modo a alcançar a maior vazão possível na célula [26]. Os blocos de alocação, também chamados de blocos de recursos, são a menor unidade de recurso de rádio alocável de uma grade símbolo / subportadora (tempo / frequência), e correspondem a 12 subportadoras para cada 14 símbolos OFDMA (1 ms), conforme apresentado na Fig. 6. Estes blocos podem ser independentemente modulados por fluxos de mais baixa taxa de bits provenientes de diferentes usuários.

2.2.4 Considerações Gerais para Estratégias de Alocação de Recursos

O algoritmo utilizado pelo agendador está relacionado com o esquema de codificação e modulação adaptativa (*Adaptive Modulation and Coding* – AMC) e o protocolo de retransmissão HARQ (*Hybrid Automatic Repeat reQuest*). Isto se deve ao fato de que, em primeiro lugar, além de alocação dinâmica de recursos físicos, as medições do canal também são utilizadas para adaptar o AMC. Em segundo lugar, a dinâmica de filas, que impacta na vazão de dados e atraso da conexão vista pela aplicação, depende do protocolo HARQ e do tamanho dos blocos de transporte.

Existe um compromisso entre a codificação de canal e as retransmissões fornecidas pela HARQ. Isto permite a eficiência espectral de uma transmissão individual em um *subframe* e o número de *subframes* em que se realizam as retransmissões. Os algoritmos de agendamento bem projetados consideram todos esses aspectos [20].

Em geral, os algoritmos de agendamento podem fazer uso de informações de medição que influenciam as decisões: medições de tráfego e informação de estado do canal (*Channel State Information* - CSI). Estas informações são obtidas por medições na *eNodeB* ou através de canais de sinalização de realimentação, ou uma combinação de ambos.

Com base nas informações de medição disponíveis, o agendador deve gerenciar as necessidades de todos os UEs para garantir que os recursos de rádio sejam suficientemente alocados para cada UE com latências aceitáveis para satisfazer as suas exigências de QoS, de forma a usar o espectro eficientemente. Os detalhes deste processo não são padronizados, dado que é executado de forma interna à *eNodeB*. Isto permite que algoritmos específicos sejam desenvolvidos, que podem ser otimizados para situações específicas, em conjunto com os operadores de rede [20]. No entanto, os dados para agendamento de recursos são comuns a todos.

No desenvolvimento de um algoritmo de agendamento, pode-se escolher entre os dois tipos de algoritmos: de agendamento justo e agendamento oportunista. O primeiro visa diminuir a latência e garantir uma taxa mínima de dados para cada usuário. Isto é importante para aplicações em tempo real, tais como vídeo *streaming*, onde uma determinada taxa mínima deve ser garantida independentemente do estado de canal. O segundo é normalmente projetado para maximizar a soma das taxas de dados transmitidas para todos os usuários, explorando o fato de que diferentes usuários experimentam diferentes ganhos de canal e, portanto, irão experimentar

boas condições de canal em diferentes momentos e frequências. O problema do agendamento oportunista consiste na dificuldade de garantir a justiça e QoS necessários. Os usuários nem sempre podem esperar até que as condições do canal sejam favoráveis para a transmissão

Na prática, a maioria dos algoritmos de agendamento possuem características dos dois tipos de agendadores apresentados, incluindo elementos de ambos para garantir as exigências de QoS. Uma variedade de métricas podem ser usadas para quantificar o grau de justiça de um agendador em uma tentativa de prover boas taxas para usuários com boas condições de canal sem esquecer dos usuários com más condições de canal [20].

2.2.5 Algoritmos de Agendamento

O agendamento multiusuário tem sua base entre a teoria de informação e teoria das filas, visando aumento na alocação de recursos e a maximização da capacidade. Antes de desenvolver um algoritmo, uma métrica relacionada com a capacidade deve ser inicialmente formulada e então otimizada em todas as possíveis soluções de alocação de recursos que satisfaçam um conjunto de restrições pré-determinadas. Tais restrições podem ser físicas ou relacionadas com a QoS. A teoria da informação [38] oferece uma gama de possíveis métricas de capacidade que são relevantes em diferentes cenários. Dois exemplos que podem ser destacados são a capacidade de canal e a capacidade de latência.

A capacidade de canal é definida como a taxa máxima de dados que pode ser enviada através do canal com baixa probabilidade de erro. A informação mútua entre o transmissor e o receptor varia de acordo com o canal. A métrica de capacidade de canal considera a taxa de dados média de longo prazo, que pode ser entregue a um usuário quando o usuário não possui restrições de latência.

A capacidade de latência é definida como a taxa de transmissão que pode ser assegurada ao longo do percurso, sob algumas restrições. É coordenada entre os usuários e os blocos de recursos com o objetivo de manter a informação mútua constante independentemente do desvanecimento sofrido ao longo do caminho. A capacidade de latência é importante para o tráfego de dados onde uma determinada taxa de transmissão deve ser garantida durante todo o tempo de conexão, independente de interferências possíveis ao longo do percurso.

Vários algoritmos de agendamento presentes na literatura têm sido empregados nas redes LTE. Desses, os mais conhecidos são: *Best CQI* ou *Maximum Carrier-to-Interference* [13], *Round-Robin* [9] e *Proportional Fairness* [27].

A técnica *Best CQI* classifica os usuários de acordo com o CQI instantâneo, provendo mais recursos de rádio para aqueles que possuem melhor qualidade instantânea de canal. Esta técnica maximiza a vazão total, mas limita a capacidade de usuários no sistema, uma vez que apenas usuários com bons canais de comunicação receberão recursos de rádio. A vantagem consiste na facilidade de implementação, e quando AMC são usadas, o sistema atinge máxima vazão de dados (*throughput*). Porém a equidade de diferentes usuários não é totalmente considerada. Usuários com condição ruim de canal podem não ser atendidos, tendo o tráfego de dados bloqueados.

Segundo [28], o algoritmo *Round Robin* (RR) é simples e fácil de implementar. Esta técnica torna o agendamento mais justo. O usuário que estiver esperando por mais tempo será atendido primeiro. Porém, não leva em conta a qualidade do canal para determinar o número de bits a ser transmitido e, devido ao enlace adaptativo do sistema, o agendador pode alocar uma parcela considerável de recursos para um usuário com indicador ruim de canal. Isto pode degradar significativamente a vazão total de dados.

A técnica *Proportional Fairness* [29] é a mais comumente utilizada [30]. Este agendador procura atender a relação de compromisso entre maximizar a vazão de dados do sistema e permitir um nível mínimo de serviço para todos os usuários. É o compromisso entre equidade (*fairness*) e performance. Isto geralmente é realizado adicionando-se alguma forma de priorização inversamente proporcional à quantidade de recursos de rádio estimada para um dado usuário. Todo usuário terá uma prioridade alocada e o usuário com maior prioridade é servido a qualquer momento. Entretanto, o problema desta técnica consiste em não garantir uma latência fixa para os usuários, o que limita as aplicações baseadas em serviços multimídia de tempo real.

2.2.6 Considerações para Agendamento de Recursos em Redes LTE

Nas redes LTE, cada canal lógico possui sua restrição de QoS, que deve influenciar o comportamento do algoritmo de agendamento. Com base em condições de rádio e de tráfego, as restrições de QoS devem ser atualizadas para cada serviço. O mapeamento das restrições de QoS

de diferentes serviços e o algoritmo de agendamento pode ser um fator de diferenciação fundamental entre fabricantes de equipamentos de rede [20].

Uma restrição importante para o algoritmo de agendamento é a precisão do conhecimento da *eNodeB* da qualidade do canal dos UEs ativos na célula. O modo em que essa informação é fornecida para o agendador nas redes LTE é diferente nos canais de descida e subida. Na prática, para o canal de descida, essa informação é fornecida por meio do CQI dos UEs, enquanto que para o canal de subida, a *eNodeB* pode usar sinais de referência (*Sounding Reference Signals* - SRSs) ou outros sinais transmitidos pelos UEs para estimar a qualidade do canal.

A frequência com que os relatórios de CQI e SRS são transmitidos é configurável pela *eNodeB*, permitindo respeitar o compromisso entre atualização de informações e sobrecarga de sinalização. Se o relatório mais recente de CQI ou SRS for recebido muito tempo antes de ser tomada a decisão de agendamento, o desempenho do algoritmo de agendamento pode ser significativamente degradado.

2.2.7 Adaptação de Enlace

O sistema LTE emprega comutação por pacote fim-a-fim desde a rede de acesso de rádio, *backbone* e rede núcleo. Na interface aérea do LTE, a otimização do tráfego reflete a capacidade do canal de cada usuário. O processo de otimização ajusta dinamicamente os esquemas de modulação e codificação de canal, buscando obter a mais alta taxa de bits possível para cada usuário de acordo com as condições do seu canal. O indicador de qualidade de canal (*Channel Quality Indicator* - CQI) é um parâmetro de entrada importante, que é informado pelo terminal do usuário (UE) no canal de subida. O CQI é um indicador de taxa de dados suportada pelo canal levando em conta o nível de SINR e as características do receptor do UE. A partir de sinais de referência do canal de descida, o UE pode estimar o canal e informar os parâmetros de modulação e de codificação mais altos que podem ser decodificados com probabilidade de erro de bloco (*Block Error Rate* - BLER) não maior que 10%. Na adaptação do enlace de subida, não é necessário informar a *eNodeB* sobre a condição de canal, uma vez que a mesma pode estimá-la diretamente através de sinais de referência do canal de subida.

A especificação da tecnologia LTE define a sinalização disponível entre a *eNodeB* e o UE para a adaptação do enlace (modulação e codificação de canal) pela *eNodeB*. Os métodos de

otimização não são padronizados, o que provê grande flexibilidade na forma de se explorar a informação disponível para realizar a adaptação do enlace. A escolha dos parâmetros de modulação e da taxa de codificação não depende apenas das condições do canal. Esta escolha depende de uma série de fatores adicionais, que incluem a qualidade de serviço requerida e a vazão da célula. Adicionalmente, os métodos de adaptação de enlace devem operar em conjunto com os métodos de agendamento, para compartilhamento eficiente de blocos de alocação de rádio entre os usuários durante a variação da capacidade de canal individual.

2.3 TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

2.3.1 Análise de Decisão

Os problemas de decisão que envolvem um número finito de alternativas surgem com frequência na prática. Exemplos incluem seleção de uma universidade para estudo, seleção de um empregado para determinada vaga de emprego, aquisição de um imóvel, prever o resultado da eleição de um conselho escolar, reduzir despesas de uma repartição para atender às novas restrições orçamentárias ou mesmo adquirir um carro novo, entre outros. O Processo Analítico Hierárquico (AHP) é uma ferramenta de destaque para lidar com decisões sob certeza, nas quais o julgamento subjetivo é quantificado de maneira lógica e depois usado como base para chegar a uma decisão. A técnica AHP é projetada para situações nas quais ideias, sentimentos e emoções que afetam o processo de decisão são quantificados para fornecer uma escala numérica a fim de determinar prioridades de alternativas [12].

A principal ideia do método AHP é selecionar pesos relativos que descrevem a importância de cada critério das hierarquias, classificando as alternativas de decisão. Cada hierarquia pode possuir n critérios.

O Processo Analítico Hierárquico (AHP), desenvolvido por Thomas L. Saaty no início da década de 1970, é uma técnica estruturada para a organização e análise de decisões complexas, com base em matemática e psicologia. O método AHP ajuda os tomadores de decisões a encontrar a solução que melhor se adapta à compreensão e solução do problema. Ele fornece um procedimento para a estruturação de um problema de decisão, representando e quantificando os seus elementos, obtendo a avaliação de alternativas de soluções.

O método AHP consiste em decompor um problema de decisão dentro de uma hierarquia de subproblemas, tornando compreensão mais fácil. Desta forma, cada um dos subproblemas pode ser analisado de forma independente. Os elementos da hierarquia podem se relacionar com qualquer aspecto do problema de decisão.

Uma vez que a hierarquia é construída, um tomador de decisão deve avaliar sistematicamente os elementos, comparando-os uns aos outros em pares, no que diz respeito ao seu impacto sobre um elemento acima deles na hierarquia. Ao fazer as comparações, pode usar dados concretos sobre os elementos ou o próprio julgamento sobre a importância dos elementos. Isto consiste na essência da técnica AHP, o julgamento humano é utilizado nas avaliações. O método AHP converte as avaliações em valores numéricos que podem ser processados e comparados em toda a extensão do problema. Um peso numérico, ou prioridade, é calculado para cada elemento da hierarquia, permitindo que elementos distintos sejam comparados entre si de uma maneira racional e consistente.

2.3.2 Usos e Aplicações do método AHP

As situações de decisão as quais o método AHP pode ser aplicado incluem [35]:

- *Escolha* - A seleção de uma alternativa a partir de um determinado conjunto de alternativas, geralmente onde há múltiplos critérios de decisão;
- *Ranqueamento* - Colocando um conjunto de alternativas em ordem do mais desejável para o menos desejável;
- *Priorização* - Determinar o mérito relativo dos membros de um conjunto de alternativas, em oposição a uma única seleção ou classificação;
- *Alocação de recursos* - divisão de recursos entre um conjunto de alternativas;
- *Gestão da qualidade* - Lidar com os aspectos multidimensionais da qualidade e melhoria da qualidade.

As aplicações do método AHP para situações que envolvem decisões complexas têm produzido resultados abrangentes em problemas que envolvem planejamento, alocação de recursos, definição de prioridades e escolha entre alternativas [36]. Algumas utilizações do método AHP são discutidas na literatura [37]:

- Decisão sobre a melhor forma de reduzir o impacto das mudanças climáticas globais;
- Quantificar a qualidade global de sistemas de *software*;
- Seleção de professores da universidade;
- Avaliação de riscos em dutos de petróleo;
- Decisão sobre qual a melhor forma de gerir bacias hidrográficas dos Estados Unidos.

Capítulo 3

MÉTODO PROPOSTO DE ESCALONAMENTO

Esta seção apresenta, em detalhes, as características e conceitos do algoritmo Agendador Customizável, proposta deste trabalho, que é baseado no algoritmo *Proportional Fairness*. A principal diferença entre os dois agendadores é a atribuição de prioridades através da agregação de critérios de desempenho por meio método de tomada de decisão multicritério AHP.

3.1 DESCRIÇÃO PROCEDURAL DO ALGORITMO

O esquema de agendamento proposto é uma versão modificada do agendador *Proportional Fairness*, que usa a técnica AHP. As particularidades do desenvolvimento e o funcionamento do algoritmo *Proportional Fairness* podem ser vistos em [9,31].

Os passos para o desenvolvimento do método AHP no algoritmo Agendador Customizável são apresentados como segue:

1. Definição dos critérios para a primeira hierarquia. Cada hierarquia pode possuir n critérios. São eles: CQI (C) e taxa atingível de dados (R). Estes critérios foram escolhidos devido a sua importância no processo de alocação de recursos no algoritmo base deste trabalho;
2. Geração de uma matriz A de comparação $n \times n$, par a par, que quantifica o julgamento em relação à priorização dos diferentes critérios. Segundo [12], a comparação par a par é feita de tal maneira que o critério na linha i ($i=1,2,...,n$) é classificado em relação a todos os outros critérios. Definindo o elemento (i,j) da matriz A como a_{ij} , o método AHP usa uma escala discreta de 1 a 9 na qual $a_{ij}=1$ significa que i e j tem igual importância, $a_{ij}=5$ indica que i é muito mais importante do que j e $a_{ij}=9$ indica que i é muitíssimo mais importante do que j . Outros valores entre 1 e 9 são interpretados de maneira correspondente. A consistência implica que se $a_{ij} = k$, então $a_{ji} = 1/k$. Os elementos a_{ij} da diagonal de principal são iguais a 1 porque classificam um critério em relação a ele mesmo.

3. Normalização da matriz A . Cada elemento da matriz A é dividido pela soma dos elementos da coluna em questão. É gerada uma nova matriz normalizada N . A definição dos pesos relativos de cada critério da primeira hierarquia é obtida fazendo-se a média de cada linha da matriz normalizada N .
4. Definição das alternativas e da importância relativa entre elas.
5. Criação das novas matrizes A_c e A_R , cada uma dentro do respectivo critério. A quantidade de elementos das matrizes depende da quantidade de alternativas dentro de cada critério
6. Normalização das matrizes A_c e A_R em novas matrizes N_c e N_R , repetindo o procedimento apresentado no passo 3.
7. Definição dos pesos das alternativas dentro de cada um dos critérios da primeira hierarquia fazendo-se a média de cada linha da matriz normalizada N_c e N_R .
8. Cálculo do peso composto de cada elemento.

3.1.2 Diagrama de blocos

A descrição apresentada na seção anterior pode ser resumida no diagrama de blocos da Fig. 8.

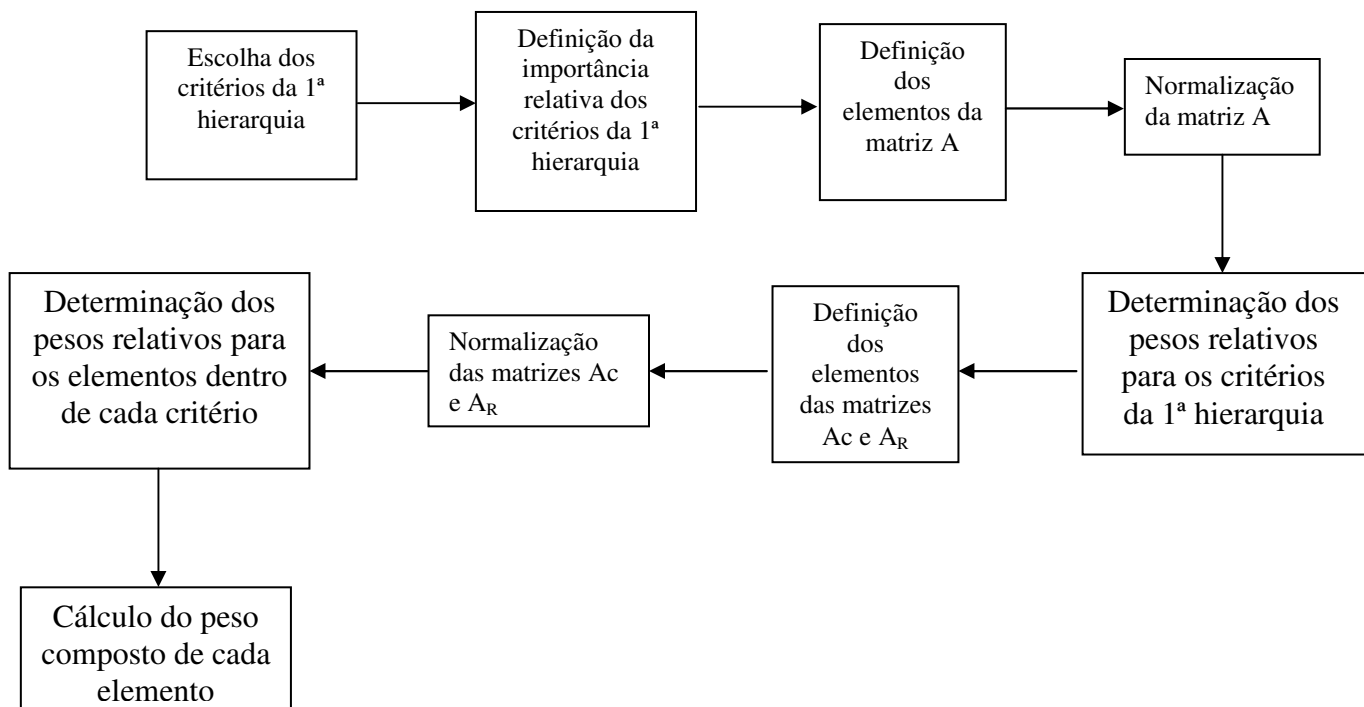


Fig. 8 - Diagrama de blocos para os procedimentos do método AHP.

3.2 Algoritmo proposto: Agendador Customizável

O algoritmo customizável proposto neste trabalho utiliza o algoritmo *Proportional Fairness* como base, adotando o método de tomada de decisão multicritério AHP para definir pesos diferentes para critérios diferentes, ajustando assim as preferências de forma customizada e, por exemplo, o ajuste customizável permite favorecer o tráfego de vídeo.

A estrutura geral da técnica AHP pode incluir várias hierarquias de critérios. A matriz correspondente a cada hierarquia quantifica o julgamento no que se refere à importância relativa dos diferentes critérios

3.2.1 Estudo de Caso 1

O problema de decisão do algoritmo proposto consiste em priorizar tipos selecionados de serviços para a atribuição de maior quantidade de recursos de rádio. Para os estudos de casos apresentados neste trabalho, os usuários de vídeo foram selecionados para serem priorizados por meio da escolha à medida de elementos das matrizes de comparação.

Para demonstrar o procedimento, é apresentado o caso de estudo 1, que envolve a alocação de pesos para dois critérios e utiliza três usuários como alternativas. A estrutura do problema pode ser vista na Fig. 9. Estes critérios são comumente utilizados no processamento para alocação de recursos de rádio para usuários das redes LTE.

Inicialmente, foi escolhida uma matriz de comparação par a par para os critérios, nomeada CQI e taxa de dado atingível do usuário, o que estabelece a primeira hierarquia de critérios. Os elementos podem ser vistos na matriz de comparação A , dada por

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1/5 \\ 5 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Os símbolos R e C são utilizados para denotar os respectivos critérios. A primeira linha e primeira coluna da matriz A se referem ao critério R (taxa atingível) e a segunda linha e a segunda coluna se referem ao critério C (CQI). O fato do valor de $a_{21} = 5$ indica, neste caso particular, que o CQI é muito mais importante do que a taxa atingível. Esta atribuição implica

automaticamente que $a_{12} = 1/5$. Porém, como será visto mais adiante, existem casos em que o simples fato do correspondente simétrico do peso ser o seu inverso não garante a consistência da matriz.

Os pesos relativos de R e C são determinados através da normalização, gerando a nova matriz N, dada por

$$N = \begin{pmatrix} 0.17 & 0.17 \\ 0.83 & 0.83 \end{pmatrix} \quad (2)$$

O processo para normalização requer dividir os elementos de cada coluna pela soma de seus elementos. Assim, para calcular a matriz N, os elementos da primeira coluna foram divididos por $(1 + 5 = 6)$ e os da segunda coluna por $(1/5 + 1 = 1.2)$. Portanto, os pesos relativos desejados para os critérios R e C, w_R e w_C respectivamente, são calculados como a média da linha correspondente. Os cálculos resultaram em 0.17 e 0.83 respectivamente, o que indica que para este caso, a importância de R é proporcional a 17%, enquanto que C é 83% importante. Logo temos que $(w_R, w_C) = (0.17; 0.83)$.

Os pesos relativos para as três alternativas de usuários (1, 2, 3) são determinados dentro de cada um dos critérios C e R usando duas matrizes de comparação, A_C (3) e A_R (4), cujos elementos são baseados no julgamento da importância relativa dos tráfegos de transferência de arquivos (F), áudio (D) e tráfego de vídeo (V).

A primeira linha e coluna das matrizes A_C e A_R se referem ao serviço F. A segunda linha e coluna se referem ao serviço D, e a terceira linha e coluna se referem ao serviço V.

$$A_C = \begin{pmatrix} 1 & 1/4 & 1/7 \\ 4 & 1 & 1/3 \\ 7 & 3 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$A_R = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 \\ 2 & 1 & 1/2 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Repetindo o procedimento da matriz de normalização N , foram obtidas as matrizes N_C (5) e N_R (6), dadas por

$$N_C = \begin{pmatrix} 0.0833 & 0.0588 & 0.0968 \\ 0.333 & 0.2352 & 0.2258 \\ 0.5833 & 0.70588 & 0.6775 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$N_R = \begin{pmatrix} 0.1666 & 0.1428 & 0.1818 \\ 0.333 & 0.2857 & 0.2727 \\ 0.5 & 0.5714 & 0.5455 \end{pmatrix} \quad (6)$$

As médias das linhas da matriz N_C foram calculadas como segue. A média da primeira linha, correspondente ao peso do tráfego F, é $w_{CF} = 0.0796$. Na segunda linha, o peso do tráfego D é $w_{CD} = 0.2646$. Finalmente, na terceira linha, correspondente ao peso do tráfego de V foi obtida $w_{CV} = 0.6556$. Repetindo o procedimento para a matriz N_R , foram obtidas $(w_{RF}, w_{RD}, w_{RV}) = (0.1638; 0.2972; 0.5389)$.

Para demonstrar o processo de decisão, é ilustrada a montagem da árvore, com os respectivos pesos, dos critérios da primeira hierarquia e das alternativas.

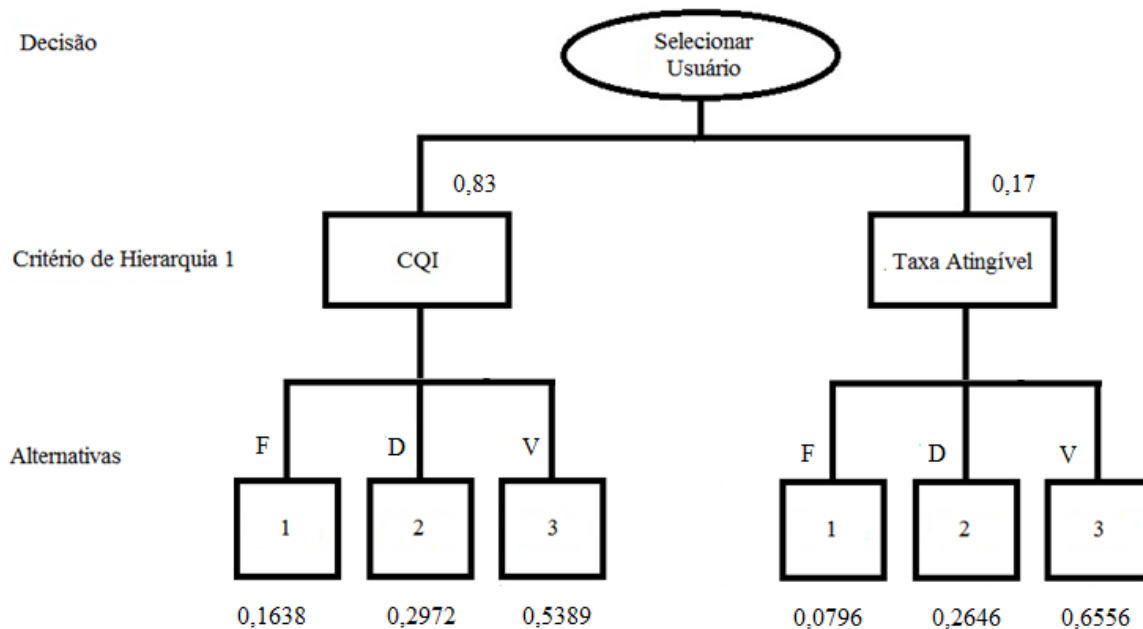


Fig. 9 – Estrutura do problema de decisão com os pesos.

O primeiro critério de hierarquia representa a importância dos pesos relativos dos critérios CQI (C) e taxa atingível (R) no processo de seleção de usuário para alocação de recursos. As alternativas são os usuários com pesos atribuídos ao tipo de tráfego com relação ao critério de hierarquia 1. O procedimento consiste em multiplicar o peso do critério C (w_C) pelo peso do tráfego do usuário $i \in (1,2,3)$ e, em seguida, multiplicar o peso do critério R (w_R) pelo peso do tráfego do usuário $i \in (1,2,3)$. A determinação do peso composto é dada pela soma destas multiplicações.

Para efeito de comparação entre os algoritmos, considere que no agendador Proportional Fairness, $Ri(k)$ representa a taxa de dados atingível para o usuário i no intervalo de transmissão k , que depende das condições atuais do canal de comunicação do usuário. Já $Ti(k)$ representa o histórico de dados acumulado pelo usuário i no intervalo de transmissão i [31]. O processo de seleção do usuário neste agendador é baseado na Eq. 7. O usuário com o valor mais alto de $P(i)$, dada pela Eq. 7 é agendado naquele momento.

$$P(i) = \frac{Ri(k)}{Ti(k)} \quad (7)$$

No algoritmo Agendador Customizável, diferentes usuários impõem um nível hierárquico adicional na árvore AHP, assim o peso composto calculado no presente trabalho modifica P , aumentando ou diminuindo a taxa de alocação de recursos para diferentes tipos de serviços de dados.

3.2.2 Estudo de Caso 2

A customização apresentada no caso de estudo 1 possui todas as matrizes consistentes. O procedimento para a análise de consistência das matrizes de comparação será visto mais adiante, na seção 3.5.

Para demonstrar um procedimento que envolva pelo menos uma matriz inconsistente, é apresentado o caso de estudo 2. Neste caso, quando uma das matrizes de comparação par a par for inconsistente, é necessária uma nova estimativa dos elementos a_{ij} da matriz para obter melhor consistência, conforme descrito na seção 3.4.2.1.

Utilizando os mesmos critérios para a hierarquia 1, vistos na seção 3.4.1, e repetindo o procedimento, foi obtida a matriz de comparação A, dada por

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Os pesos C e R podem ser determinados através da normalização na nova matriz N, dada por

$$N = \begin{pmatrix} 0.667 & 0.667 \\ 0.333 & 0.333 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Portanto, a média das linhas de (9) é $(w_R, w_C) = (0.667; 0.333)$.

Os pesos relativos para três alternativas (1, 2, 3) são determinados dentro de cada um dos critérios C e R usando duas matrizes de comparação A_C (10) e A_R (11), cujos elementos são baseados no julgamento da importância relativa dos tráfegos de vídeo (V), áudio (D) e transferência de arquivos (F).

$$A_C = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 1/5 \\ 2 & 1 & 1/2 \\ 5 & 2 & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$A_R = \begin{pmatrix} 1 & 1/4 & 1/6 \\ 4 & 1 & 1/5 \\ 6 & 5 & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

Repetindo o procedimento de normalização N, são obtidas as matrizes N_C (12) e N_R (13), dadas por

$$N_C = \begin{pmatrix} 0.1250 & 0.1429 & 0.1176 \\ 0.2500 & 0.2857 & 0.2941 \\ 0.6250 & 0.5714 & 0.5882 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$N_R = \begin{pmatrix} 0.0909 & 0.04 & 0.1220 \\ 0.3636 & 0.16 & 0.1463 \\ 0.5455 & 0.80 & 0.7317 \end{pmatrix} \quad (13)$$

As médias das linhas das matrizes N_C e N_R são respectivamente $(w_{CF}, w_{CD}, w_{CV}) = (0.1285; 0.2766; 0.5949)$ e $(w_{RF}, w_{RD}, w_{RV}) = (0.0843; 0.2233; 0.6924)$.

Conforme comentado na seção anterior, é possível multiplicar o peso do critério C (w_C) pelo peso do tráfego do usuário $i \in (1, 2, 3, \dots, N)$ e, em seguida, multiplicar o peso do critério R (w_R) pelo peso do tráfego de usuários $i \in (1, 2, 3, \dots, N)$. A determinação do peso composto é dada pela soma destas multiplicações. Novamente, o peso composto modifica a prioridade de alocação de recursos de rádio para os usuários.

3.3 Consistência da Matriz de Comparação

A consistência da matriz de comparação implica que a escolha da importância das comparações par a par é coerente. Matematicamente, uma matriz de comparação A é consistente se

$$a_{ij}a_{jk} = a_{ik} \text{ para todo } i, j \text{ e } k \quad (14)$$

Segundo [12], as colunas de qualquer matriz de comparação 2×2 são, por definição, dependentes e, em consequência, uma matriz 2×2 é sempre consistente.

Porém, nem toda matriz de comparação com mais de quatro elementos é consistente. Dado que a escolha para a construção dessas matrizes é feita de acordo com a priorização pretendida, com base empírica, um certo grau de erro pode ser tolerado. Para determinar se um nível de consistência é aceitável, é necessário desenvolver uma medida que quantifique a matriz de comparação A . Uma matriz A perfeitamente consistente produz uma matriz normalizada N na qual todas as colunas são idênticas.

Considerando que w é um vetor coluna com os pesos relativos w_i , $i = 1, 2, \dots, n$, A é consistente se

$$Aw = nw \quad (15)$$

Para o caso em que A não é consistente, o peso relativo, w_i , é aproximado pela média dos n elementos da linha i na matriz normalizada N . Representando o vetor média calculado por w_m , pode-se mostrar que

$$Aw_m = n_{\max} w_m, n_{\max} \geq n \quad (16)$$

Nesse caso, quanto mais próximo n_{\max} estiver de n , mais consistente é a matriz de comparação A . Desta forma, o método AHP calcula os índices de consistência (CI) e a consistência aleatória (RI) de A , dados por

$$CI = \frac{n_{\max} - n}{n - 1} \quad (17)$$

$$RI = \frac{1.98(n - 2)}{n} \quad (18)$$

Segundo [12], o índice de consistência aleatória (18) foi determinado empiricamente. Já o CI médio foi gerado aleatoriamente a partir de uma grande amostra de matrizes de comparação A .

Posto isso, é possível calcular a razão de consistência (CR), dada por

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (19)$$

Se $CR \leq 0.1$, o nível de inconsistência é aceitável. Caso contrário, a inconsistência é alta e talvez seja necessária uma nova estimativa dos elementos a_{ij} de A para obter melhor consistência. Os estudos de caso nas seções 3.4.1 e 3.4.2 apresentam respectivamente um primeiro exemplo com todas as matrizes consistentes e um segundo exemplo com pelo menos uma matriz inconsistente. Os cálculos para a análise de consistência dos estudos de caso são elaborados nas próximas duas seções.

3.3.1 Consistência do Estudo de Caso 1

No primeiro estudo de caso apresentado, as matrizes A_c (3) e A_R (4) não possuem colunas idênticas. Desta forma é necessário o cálculo da razão de consistência para cada uma delas.

Considere o vetor média das linhas das matrizes normalizadas (5) e (6) apresentadas em (20) e (21) respectivamente.

$$w_{mc} = (w_{CF}, w_{CD}, w_{CV}) = (0.0796; 0.2646; 0.6556) \quad (20)$$

$$w_{mR} = (w_{RF}, w_{RD}, w_{RV}) = (0.1638; 0.2972; 0.5389) \quad (21)$$

Representando o vetor média em (20) por w_{mc} temos:

$$A_C w_{mc} = \begin{pmatrix} 1 & 1/4 & 1/7 \\ 4 & 1 & 1/3 \\ 7 & 3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.0796 \\ 0.2646 \\ 0.6556 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2395 \\ 0.8019 \\ 2.0075 \end{pmatrix} \quad (22)$$

Que dá como resultado

$$n_{\max} = 0.2395 + 0.8019 + 2.0075 = 3.0489 \quad (23)$$

Aproximando o valor de n_{\max} para $n = 3$, é possível o CI, RI para a matriz de A_C , dados por

$$CI = \frac{n_{\max} - n}{n - 1} = \frac{3.0489 - 3}{3 - 1} = 0.0244 \quad (24)$$

$$RI = \frac{1.98(n - 2)}{n} = \frac{1.98(3 - 2)}{3} = 0.66 \quad (25)$$

Desta forma, CR é calculado por

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0244}{0.66} = 0.0370 \quad (26)$$

Como $CR \leq 0.1$, o nível de inconsistência de A_C é aceitável.

Repetindo o procedimento para a matriz A_R (4) e representando o vetor média em (21) por w_{mR} , temos

$$A_R w_{mR} = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 \\ 2 & 1 & 1/2 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.1638 \\ 0.2972 \\ 0.5389 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4921 \\ 0.8943 \\ 1.6248 \end{pmatrix} \quad (27)$$

Que dá como resultado

$$n_{\max} = 0.4921 + 0.8943 + 1.6248 = 3.0112 \quad (28)$$

Aproximando o valor n_{\max} para $n = 3$, é possível calcular o CI, RI e CR para a matriz A_R , dados por

$$CI = \frac{n_{\max} - n}{n - 1} = \frac{3.0112 - 3}{3 - 1} = 0.0056 \quad (29)$$

$$RI = \frac{1.98(n - 2)}{n} = \frac{1.98(3 - 2)}{3} = 0.66 \quad (30)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0056}{0.66} = 0.0085 \quad (31)$$

Como $CR \leq 0.1$, o nível de inconsistência de Ar também é aceitável.

3.3.2 Consistência do Estudo de Caso 2

O estudo de caso dois reflete a segunda customização do algoritmo proposto, diferente do primeiro estudo de caso. Ou seja, houve um novo julgamento do tomador de decisões e as matrizes de comparação par a par possuem novos valores. Desta forma, se faz necessária uma nova análise de consistência destas matrizes.

Repetindo a análise de consistência da seção 3.4.1, as matrizes A_C (10) e A_R (11) não possuem colunas idênticas. Desta forma, é necessário o cálculo da razão de consistência para cada uma delas.

Considere o vetor média das linhas das matrizes normalizadas (12) e (13) apresentadas em (32) e (33) respectivamente.

$$w_{mc} = (w_{CF}, w_{CD}, w_{CV}) = (0.1285; 0.2766; 0.5949) \quad (32)$$

$$w_{mR} = (w_{RF}, w_{RD}, w_{RV}) = (0.0843; 0.2233; 0.6924) \quad (33)$$

Representando o vetor média em (32) por w_{mc} temos:

$$A_C w_{mc} = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 1/5 \\ 2 & 1 & 1/2 \\ 5 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.1285 \\ 0.2766 \\ 0.5949 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3858 \\ 0.8311 \\ 1.7906 \end{pmatrix} \quad (34)$$

Que dá como resultado

$$n_{\max} = 0.3858 + 0.8311 + 1.7906 = 3.0075 \quad (35)$$

Aproximando o valor de n_{\max} para $n = 3$, os cálculos de CI, RI e CR para a matriz A_C são dados por

$$CI = \frac{n_{\max} - n}{n - 1} = \frac{3.0075 - 3}{3 - 1} = 0.00375 \quad (36)$$

$$RI = \frac{1.98(n - 2)}{n} = \frac{1.98(3 - 2)}{3} = 0.66 \quad (37)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.00375}{0.66} = 0.0056 \quad (38)$$

Como $CR \leq 0.1$, o nível de inconsistência de Ac é aceitável.

Repetindo o procedimento para a matriz Ar (11), podemos representar o vetor média em (33) por w_{mR} . Então,

$$A_R w_{mR} = \begin{pmatrix} 1 & 1/4 & 1/6 \\ 4 & 1 & 1/5 \\ 6 & 5 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.0843 \\ 0.2233 \\ 0.6924 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2555 \\ 0.6990 \\ 2.3147 \end{pmatrix} \quad (39)$$

Que dá como resultado

$$n_{\max} = 0.2555 + 0.6990 + 2.3147 = 3.2692 \quad (40)$$

Aproximando o valor de n_{\max} para $n = 3$, são calculados os valores de CI, RI e CR para a matriz Ar, dados por

$$CI = \frac{n_{\max} - n}{n - 1} = \frac{3.2692 - 3}{3 - 1} = 0.1346 \quad (41)$$

$$RI = \frac{1.98(n - 2)}{n} = \frac{1.98(3 - 2)}{3} = 0.66 \quad (42)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.1346}{0.66} = 0.2039 \quad (43)$$

Como $CR > 0.1$, o nível de inconsistência de Ar não é aceitável. Desta forma, os valores da matriz de comparação par a par Ar (11) devem ser revistos.

3.3.2.1 Solução proposta para Estudo de Caso 2:

Inconsistência permite inferir que a configuração de priorização não será adequada, considerando-se os demais tráfegos. Portanto quando o nível de inconsistência de uma matriz de

comparação par a par não é aceitável, uma nova estimativa dos elementos da matriz em questão deve ser realizada. O estudo de caso dois apresentou a matriz de comparação A_R inconsistente. Desta forma, foram escolhidos novos elementos baseados no julgamento da importância relativa dos tráfegos de vídeo (V), áudio (D) e transferência de arquivos (F) para a nova matriz A_R , dada por

$$A_R = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 \\ 3 & 1 & 1/4 \\ 5 & 4 & 1 \end{pmatrix} \quad (43)$$

Repetindo o procedimento de normalização, é obtida a matriz N_R (44), dada por

$$N_R = \begin{pmatrix} 0.1111 & 0.0625 & 0.1379 \\ 0.3333 & 0.1875 & 0.1724 \\ 0.5556 & 0.7500 & 0.6897 \end{pmatrix} \quad (44)$$

As novas médias das linhas da matriz N_R (44) são $(w_{RF}, w_{RD}, w_{RV}) = (0.1038; 0.2311; 0.6651)$.

O procedimento para a determinação dos pesos compostos continua idêntico ao descrito na seção 3.4.2. Porém agora, leva em consideração a matriz consistente A_c (10) e a nova matriz A_R (43).

A escolha de novos pesos para uma dada matriz, que não possui colunas idênticas, requer a análise da nova razão de consistência.

Considere

$$w_{mR} = (w_{RF}, w_{RD}, w_{RV}) = (0.1038; 0.2311; 0.6651) \quad (45)$$

$$A_R w_{mR} = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 \\ 3 & 1 & 1/4 \\ 5 & 4 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.1038 \\ 0.2311 \\ 0.6651 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3139 \\ 0.7089 \\ 2.1086 \end{pmatrix} \quad (46)$$

Que dá como resultado

$$n_{\max} = 0.3139 + 0.7089 + 2.1086 = 3.1314 \quad (47)$$

Aproximando o valor n_{\max} para $n = 3$, é possível calcular o CI, RI e CR para a matriz A_R , dados por

$$CI = \frac{n_{\max} - n}{n - 1} = \frac{3.1314 - 3}{3 - 1} = 0.0657 \quad (48)$$

$$RI = \frac{1.98(n-2)}{n} = \frac{1.98(3-2)}{3} = 0.66 \quad (49)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0657}{0.66} = 0.0996 \quad (50)$$

Como $CR \leq 0.1$, o novo nível de inconsistência de A_R é aceitável.

Capítulo 4

MODELO SISTÊMICO

Nesta seção são apresentadas características do simulador utilizado, bem como os parâmetros das simulações.

4.1 CONSIDERAÇÕES SISTÊMICAS

Para avaliar o desempenho de novas tecnologias complexas, como as redes LTE, simulações em nível de sistema são uma ferramenta essencial. Além disso, as simulações são necessárias e essenciais tanto para aprimorar algoritmos e procedimentos quanto para determinar o nível em que os parâmetros selecionados impactam no desempenho da rede [32]. Para a implementação e testes do cenário considerado, foi utilizado o *LTE System Level Simulador* [33]. O simulador foi projetado e desenvolvido pelo *Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering Vienna University of Technology* na Áustria. Sua utilização é de forma livre para aplicações acadêmicas [32].

O uso do simulador de LTE em nível de sistema permite analisar os efeitos do agendamento. O simulador incorpora ferramentas que permitem a simulação detalhada dos procedimentos da camada física para então verificar a comunicação de rádio entre os UEs e as eNodeBs. Assim nas simulações em nível de sistema, a camada física é abstraída por modelos simplificados que capturam suas características essenciais com alta precisão e baixa complexidade.

A parte do núcleo é constituída por um modelo de medição de *link* e um modelo de desempenho de *link*. O primeiro abstrai a qualidade da medição do *link* utilizado para a adaptação e alocação de recursos enquanto que o segundo determina a BLER do *link*, respectivamente.

Como figuras de mérito, os dados gerados pelo simulador contendo taxas de vazão de dados e taxas de erro, a partir de suas distribuições podem ser computados.

A simulação é realizada definindo uma região de interesse (*Region of Interest* – ROI) onde as eNodeBs e os terminais móveis são posicionados e um intervalo de duração em

intervalos de tempo de transmissão (*Transmission Time Intervals* - TTI) é escolhido. A transmissão e o movimento dos usuários são simulados apenas nesta área. É possível ainda escolher o comprimento, em segundos, da geração do tráfego do canal. Isso é equivalente ao tempo em que uma pessoa utiliza o terminal móvel, gerando tráfego. O número de antenas também é um parâmetro a se configurar, já que a tecnologia LTE opera com multiplexação espacial em múltiplas antenas. Nas simulações, foi utilizada uma antena para transmissão e uma antena para recepção.

Segundo [32], o fluxo o simulador segue o pseudo-código apresentado como segue:

```
for cada TTI simulado do
    mover UEs
    if UE fora da ROI then
        realocar UE randomicamente na ROI
    for cada eNodeB do
        receber feedback do UE após um dado atraso de feedback
        agenda usuários
    for cada UE do
        1- estado do canal -> modelo qualidade do link -> SINR
        2- SINR, MCS -> modelo de desempenho de link -> BLER
        3- mande o feedback do UE
```

Onde "->" representa o fluxo de dados para dentro e para fora do modelo de abstração de *link*. Na implementação do sistema em MATLAB, a estrutura separada no pseudo código é refletida na programação, permitindo a fácil adição de novas funcionalidades e algoritmos.

Para abstrair a qualidade de *link* medida, a SINR foi utilizada como métrica. Segundo [32], o modelo de medição de *link* abstrai as medições para adaptação de *link* e para alocação de recursos visando reduzir o processamento computacional, pré-gerando muitos parâmetros necessários, tornando-os disponíveis para posterior utilização nas simulações.

Para tratar da correlação espacial e temporal do canal presente em um sistema celular, o modelo de qualidade do *link* foi dividido em três partes: *Macroscopic pathloss*, *Shadow fading* e *Small-Scale Fading* (SISO and MIMO). *Macroscopic pathloss* é usado para modelar a perda por

propagação devido à distância entre a *eNodeB* e o UE e devido ao ganho de antena. *Shadow fading* é causado por obstáculos no caminho de propagação entre o UE e a *eNodeB* e pode ser interpretada como as irregularidades das características geográficas do terreno relacionadas com modelo do primeiro. Enquanto as perdas causadas por *macroscopic pathloss* e *shadow fading* são invariante no tempo e dependente da posição, *small-scale fading* é modelado como um processo dependente do tempo. Mais detalhes sobre modelos podem ser vistos em [32].

O modelo de desempenho do *link* determina a BLER no receptor a partir da alocação de recursos e do esquema de modulação e codificação (*Modulation and Coding Scheme* - MCS). Para a tecnologia LTE, 15 diferentes MCSs são definidos, relacionados por 15 valores de CQI. Os valores pré-definidos de CQIs utilizam taxas de codificação entre 1/13 e 1 combinados com as modulações 4-QAM, 16-QAM e 64-QAM [39].

Para avaliar a BLER dos blocos de transporte recebidos (TBs), um conjunto de curvas de desempenho de *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) é empregado, gerando um mapeamento SINR para o BLER.

4.2 CONFIGURAÇÃO DA REDE

A configuração da rede de acesso de rádio consiste de uma grade hexagonal de 7 *eNodeBs*. No cenário simulado, foram considerados 3 usuários ligados a um setor da *eNodeB* central, distribuídos aleatoriamente na ROI, como mostra a Fig. 10. A tabela 2 apresenta a configuração do sistema utilizada para as simulações.

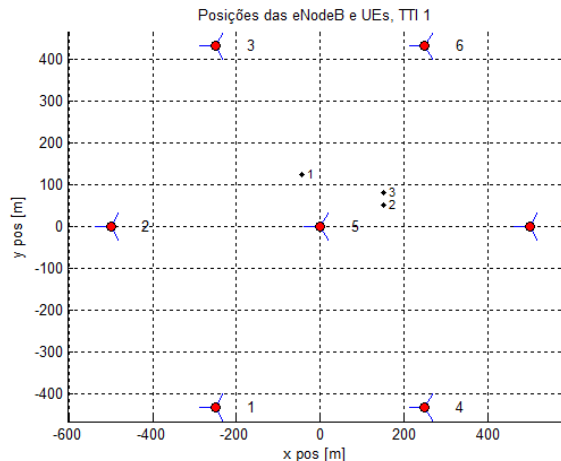


Fig. 10 – Posições das *eNodeBs* e dos usuários.

Tabela 2: Parâmetros da simulação

| Parâmetros | Valores |
|-----------------------------------|----------------------|
| Frequência | 2,14 GHz |
| Largura de banda | 5MHz |
| Transmissão SISO | 1 x 1 |
| Comprimento da simulação (TTI) | 1000 |
| Duração do <i>slot</i> | 0,5ms |
| Distância entre as eNodeBs | 500m |
| Potência de transmissão da eNodeB | 20 W |
| Disposição da rede | 7 eNodes / 3 setores |
| Número de usuários | 3 |
| Velocidade do terminal móvel | 5 Km/h |
| Número de RBs | 25 |
| Largura de banda dos RBs | 180 kHz |
| Número de subportadoras | 300 |
| Atraso do relatório CQI | 3 ms |
| Número de subportadoras por RB | 12 |
| Espaçamento das subportadoras | 15 kHz |

4.3 MODELO DE TRÁFEGO

No algoritmo customizável, proposta deste trabalho, usuários de vídeo são priorizados e, desta forma, recebem maior taxa de alocação de recursos. Para as simulações, foi considerado o tráfego de dados de vídeo baseado em [26]. No *streaming* de vídeo é assumido que cada quadro (*frame*) de dados de vídeo chega com um intervalo de tempo regular T determinado pelo número de quadros por segundo. Cada quadro de vídeo é decomposto em um número fixo de pedaços (*slices*), cada um deles sendo transmitido como um único pacote. O codificador de vídeo introduz intervalos de atraso de codificação entre os pacotes de um quadro. O tamanho dos pacotes/pedaços e os intervalos de atraso são modelados com uma distribuição *truncated Pareto*. Foi considerada a taxa bit de vídeo de 64 kbps. Os parâmetros do tráfego de *streaming* de vídeo são apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros do tráfego de vídeo

| Parâmetros | Caracterização Estatística |
|--|--|
| Tempo inter-chegadas entre o começo de cada quadro | Determinístico em 100ms (10 quadros por segundo) |
| Número de pacotes (<i>slices</i>) em um quadro | Determinístico, 8 pacotes por quadro |
| Tamanho do Pacote (<i>slice</i>) | Distribuição <i>Truncated Pareto</i> , média 100 bytes |
| Tempo inter-chegadas entre pacotes | Distribuição <i>Truncated Pareto</i> , média 6ms |

O módulo de agendamento utilizado é capaz de agendar usuários com tráfego de dados misto. Consideramos um exemplo com combinação de tráfegos de voz e vídeo. O modelo implementado em *Matlab* é baseado em um componente principal conectado a um módulo gerador de tráfego. O tipo do tráfego de cada usuário é gerado aleatoriamente pelo simulador. O agendador é capaz de avaliar o número de bits transmitidos, a média da vazão do fluxo de dados do setor da eNodeB em questão e a taxa de alocação de blocos de recursos. Além do mais, diferencia os tipos de tráfego de dados dos usuários. Assim, somado ao uso da qualidade de canal e de outros critérios de desempenho, é possível priorizar o acesso aos recursos de rede para um determinado tipo de tráfego de dados.

Capítulo 5

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados da aplicação do algoritmo a dois cenários distintos. Para tanto, são apresentadas curvas que demonstram o comportamento da alocação de blocos de alocação para os usuários de interesse apresentados no Capítulo 3. São também apresentadas curvas de desempenho global da célula alvo. No primeiro cenário, usuários com tráfego de áudio e vídeo são agendados. No segundo e terceiro cenários, usuários com tráfego de áudio, vídeo e transferência de arquivos são considerados. Os agendadores considerados nos cenários são o Agendador Customizável, proposta deste trabalho, o *Proportional Fairness*, o *Round Robin* e o *Best CQI*.

5.1 Cenário 1: Estudo de Caso 1

A priorização de um serviço de dados se dá a partir do aumento da taxa de alocação de recursos para o tipo de tráfego selecionado. Desta forma, foram levantadas curvas que indicam a quantidade de blocos de alocação, menor unidade de alocação de recursos de rádio, designados aos usuários do tráfego em questão. Com o uso do método de tomada de decisão multicritério AHP é possível aumentar ou mesmo diminuir a taxa de alocação de recursos.

A Fig. 11 apresenta as curvas de alocação de blocos para usuários com tráfego de áudio e vídeo usando o esquema de agendamento adaptativo proposto neste trabalho, chamado de Agendador Customizável. Os tráfegos foram gerados aleatoriamente. Dado que a largura de banda utilizada na simulação é de 5MHz, é possível obter no máximo 25 blocos de alocação a cada 1ms (ou 1 TTI), agendando no máximo 25 usuários de forma simultânea.

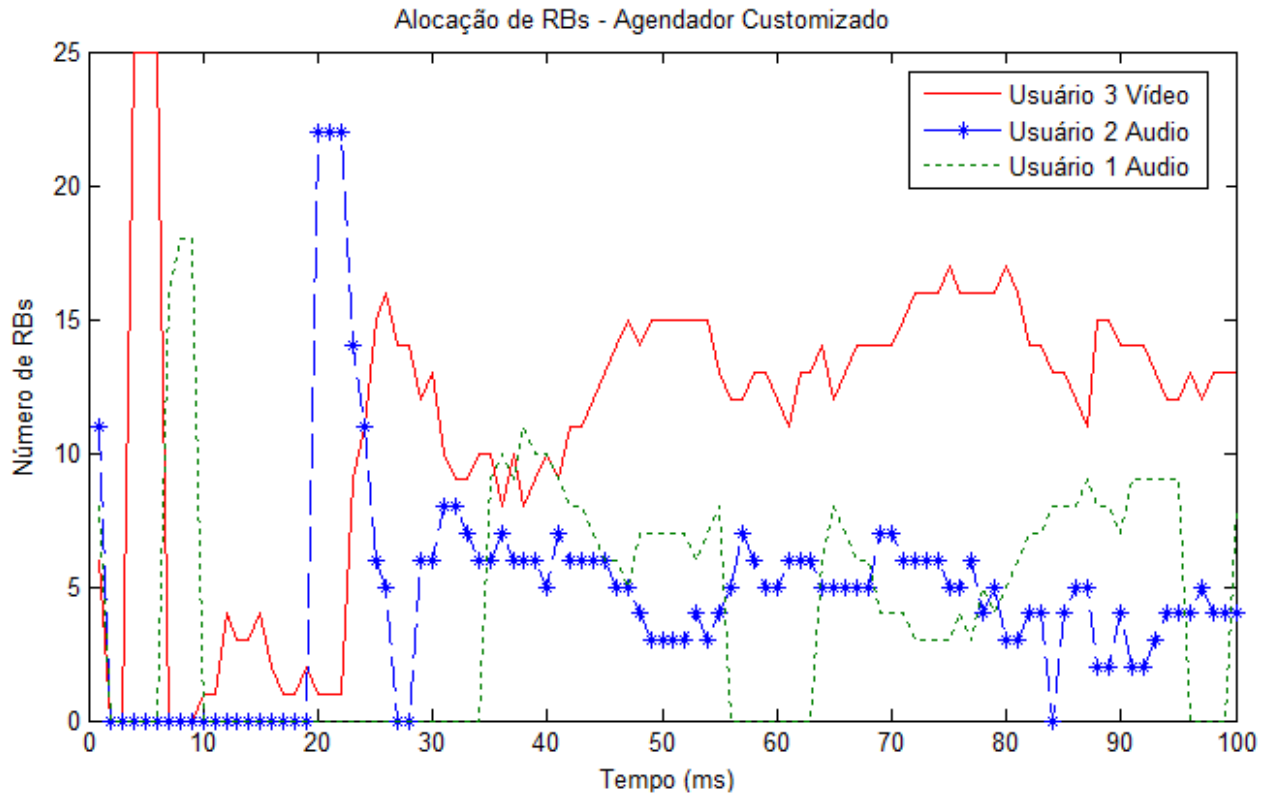


Fig. 11 - Alocação de blocos utilizando o Agendador Customizável.

As curvas nas cores azul (com símbolo ‘*’) e verde (tracejada) representam usuários com tráfego de áudio. A curva de cor vermelha (contínua) representa o usuário com tráfego de vídeo. O eixo das abscissas representa o tempo em milissegundos ou a quantidade de TTIs da simulação, enquanto o eixo das ordenadas representa o número de blocos de alocação.

A Fig. 12 apresenta a alocação de blocos para os tráfegos em questão utilizando o agendador *Proportional Fairness*. A indicação das cores das curvas são as mesmas apresentadas na Fig. 11.

Nas simulações do modelo de cenário utilizado, apenas um setor da *eNodeB* central possui usuários alocados. O fato de não existirem usuários contribuindo com transmissão de dados nas células vizinhas não parece ser um fator determinante para a melhoria da taxa de transferência de dados. De acordo com [34], o controle de potência empregado nas redes LTE visa melhorar a capacidade do sistema, gerando o mínimo de interferência possível dos usuários das células adjacentes.

Na Fig. 13, é apresentada a comparação entre as curvas de alocação de blocos para o usuário de vídeo utilizando os agendadores apresentados nas Figs. 11 e 12. Sem surpresas, a

técnica proposta neste trabalho, Agendador Customizável, provê melhor alocação de blocos do que no agendador *Proportional Fairness*. Este resultado é de alguma forma esperado. Isto pode ser explicado pelo fato do Agendador Customizável utilizar as informações de qualidade de canal do usuário e a técnica AHP para criar critérios hierárquicos, priorizando os usuários com tráfego de vídeo, no processo de agendamento.

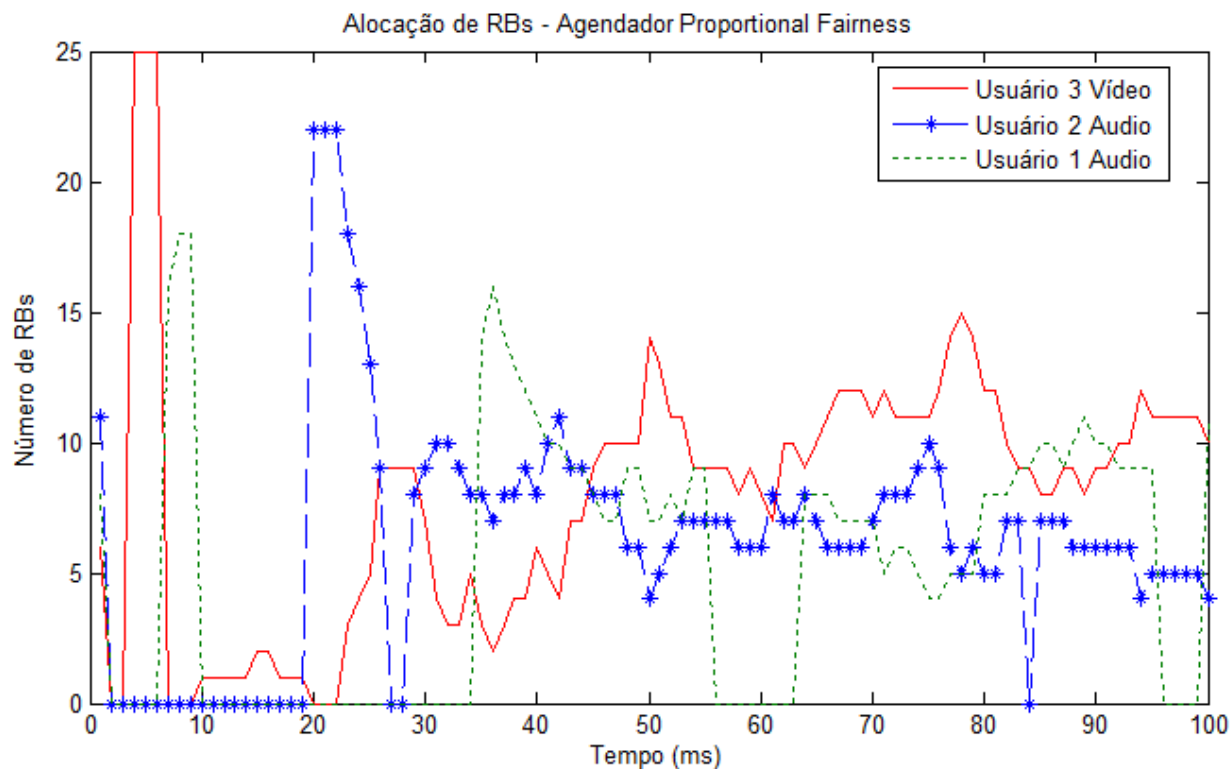


Fig. 12 - Alocação de blocos utilizando o agendador *Proportional Fairness*.

A diferença entre as duas curvas da Fig. 13 se relaciona com a escolha dos elementos das matrizes de comparação da técnica AHP. É possível aumentar, diminuir, ou mesmo acabar com esta diferença, tornando o desempenho do algoritmo Agendador Customizável similar à técnica *Proportional Fairness*, situação que ocorre quando todos os elementos das matrizes de comparação par a par forem iguais a um.

Além da taxa de alocação dos blocos, foram utilizados como figuras de mérito os parâmetros BLER e vazão de dados para avaliar o desempenho do Agendador Customizável quando comparado ao agendador *Proportional Fairness*. Estas figuras de mérito foram selecionadas para refletir a performance de cada critério do método AHP no Agendador Customizável.

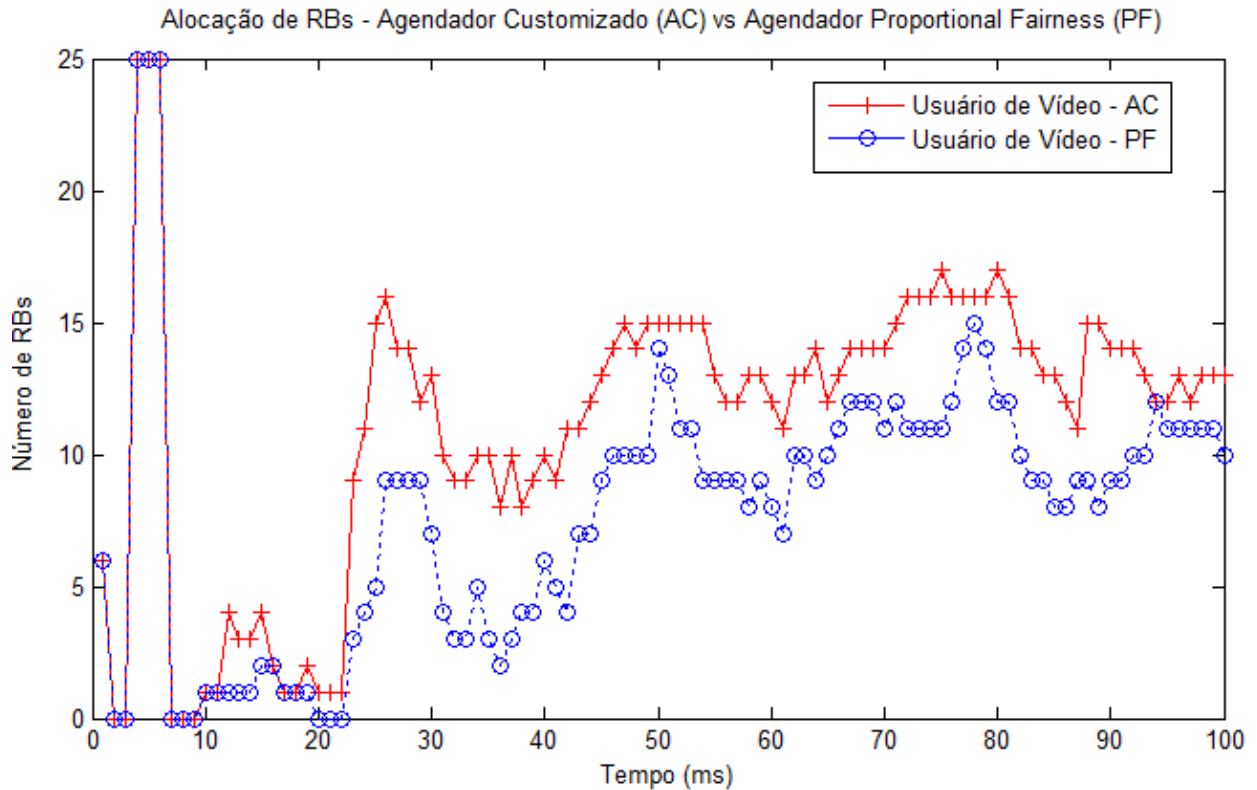


Fig. 13 - Comparação entre AC e PF para o usuário de vídeo.

A Fig. 14 apresenta as curvas de BLER do agendador proposto, enquanto que a Fig. 15 apresenta as curvas de BLER para o agendador *Proportional Fairness*. A Fig. 16 apresenta a comparação entre as curvas de BLER para o usuário de vídeo, que teve o seu tipo de tráfego priorizado pelas escolhas dos elementos das matrizes de comparação par-a-par. É possível verificar que o Agendador Customizável melhorou levemente a BLER.

A Fig. 17 apresenta a comparação do BLER total da célula para o Agendador Customizável e o Agendador *Proportional Fairness*. O primeiro obteve média de erro de bloco de 0.0907, melhor desempenho que o segundo.

A Fig. 18 apresenta a comparação entre a vazão de dados global da célula. Mesmo com o uso do método AHP, o agendador proposto se destaca neste quesito.

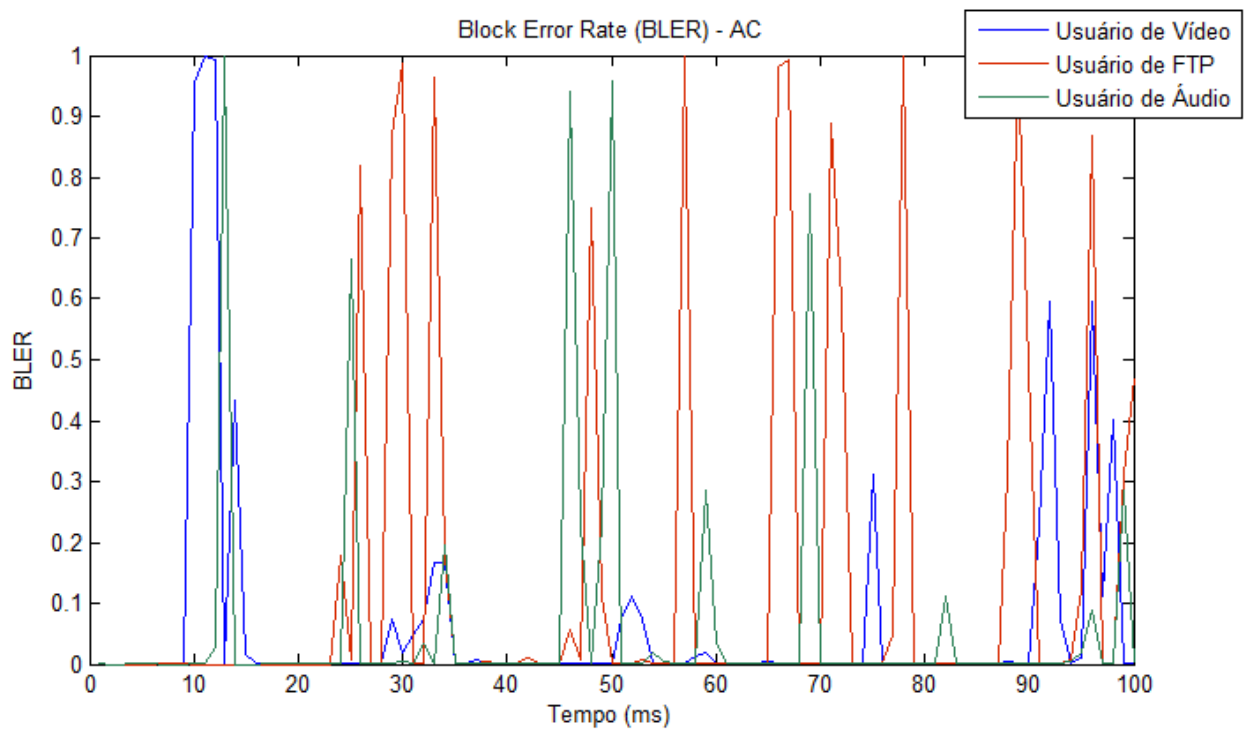


Fig. 14 – BLER do Agendador Customizável.

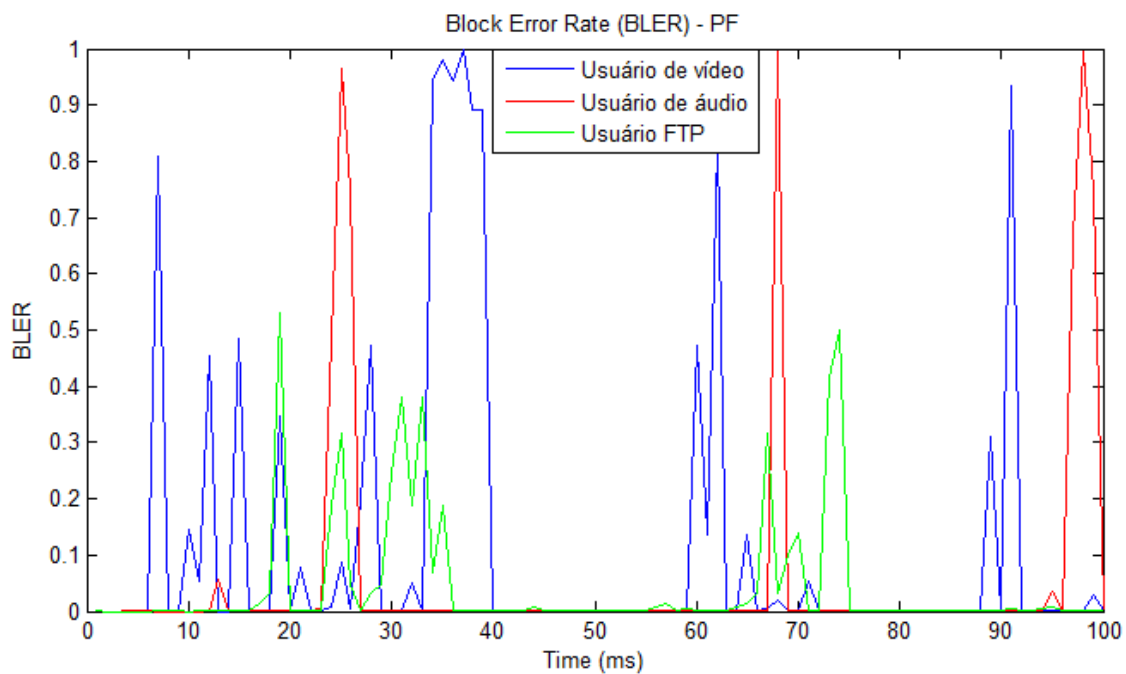


Fig. 15 – BLER do Agendador *Proportional Fairness*.

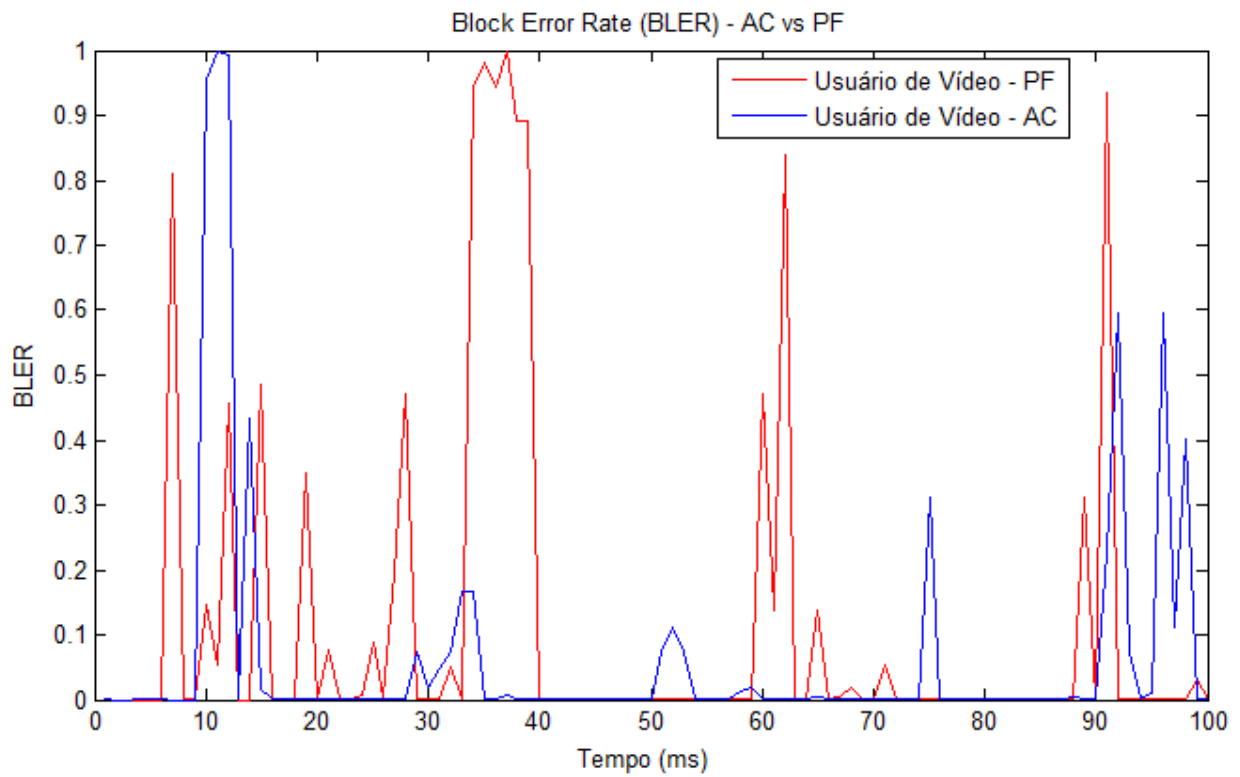


Fig. 16 – Comparação da BLER entre AC e PF.

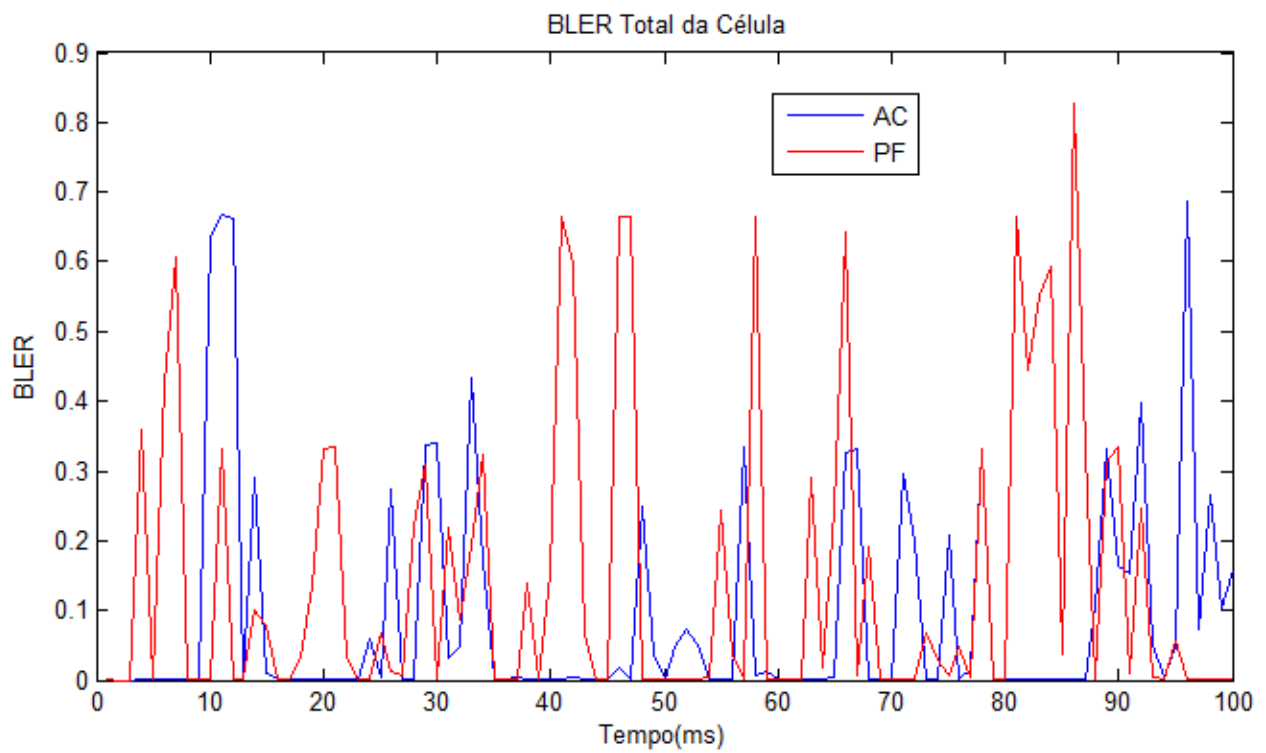


Fig. 17 – BLER Total da célula.

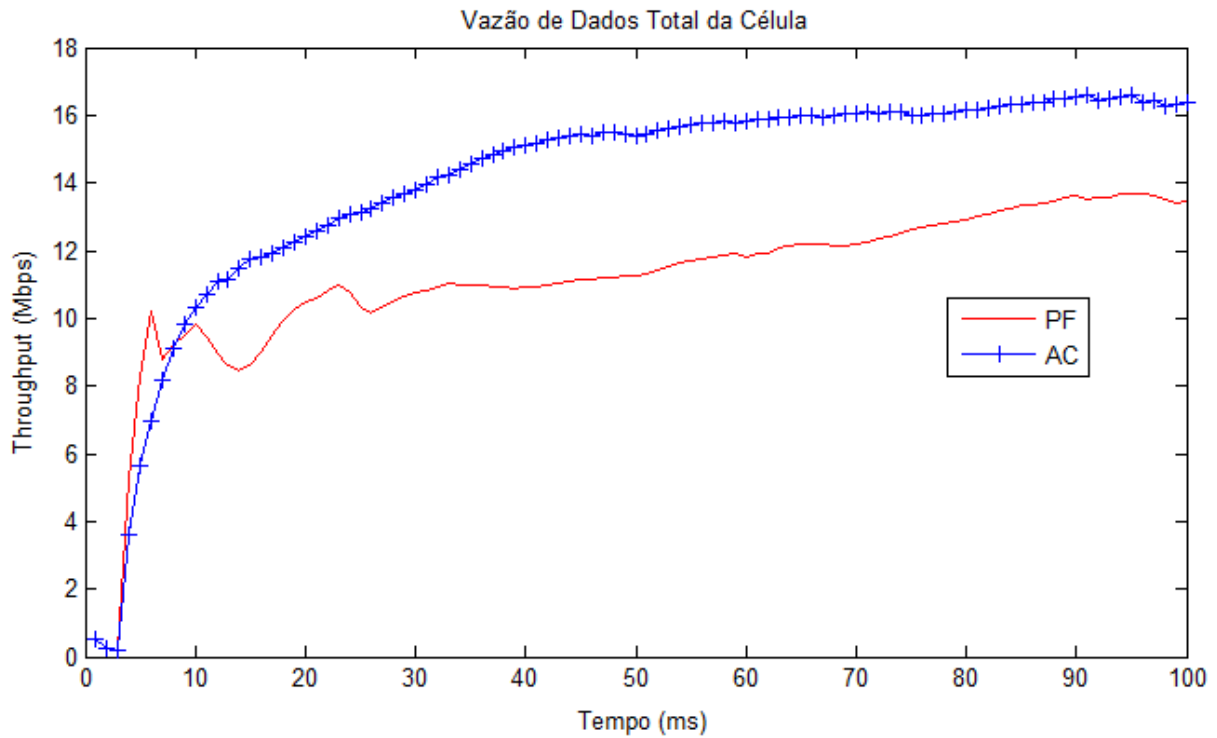


Fig. 18 – Comparação de vazão de dados.

5.2 Cenário 2: Estudo de Caso 2

O cenário dois reflete a customização apresentada no estudo de caso dois, que possui uma matriz inconsistente. Foi considerado um exemplo com participação de usuários com de tráfegos de voz, transferência de arquivo (*File Transfer Protocol* - FTP) e vídeo. Os resultados obtidos são similares aos alcançados no cenário 1. Isto se deve provavelmente a pouca variação dos parâmetros das matrizes de comparação, o suficiente apenas para tornar a matriz que antes era inconsistente em uma matriz consistente. Uma variação maior dos parâmetros derivaria em resultados diferentes.

A Fig. 19 apresenta as curvas de alocação de blocos para o Agendador Customizável.

A Fig. 20 apresenta a alocação de RBs com o agendador *Proportional Fairness*.

A Fig. 21 apresenta a comparação entre as técnicas Agendador Customizável e Agendador *Proportional Fairness* para o usuário de vídeo. A taxa de alocação da primeira técnica supera a segunda por mais de 75% do tempo.

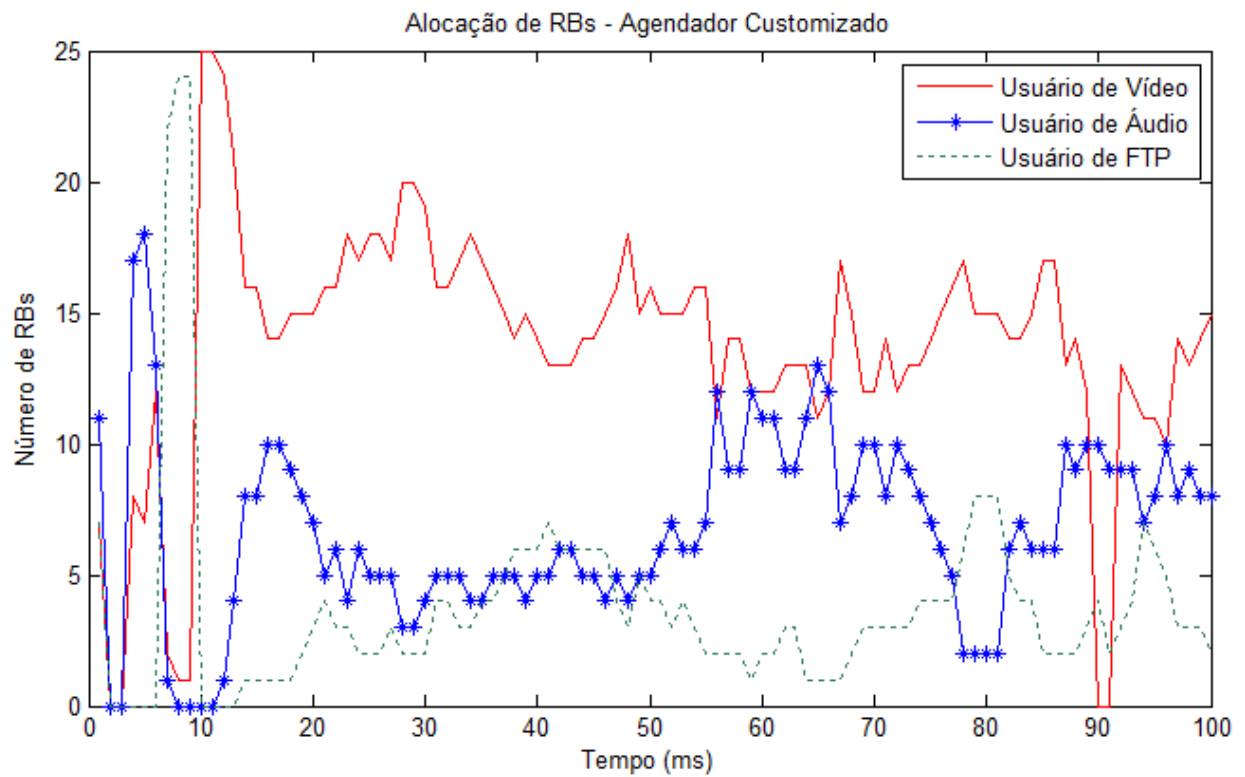


Fig. 19 - Alocação de blocos utilizando o Agendador Customizável.

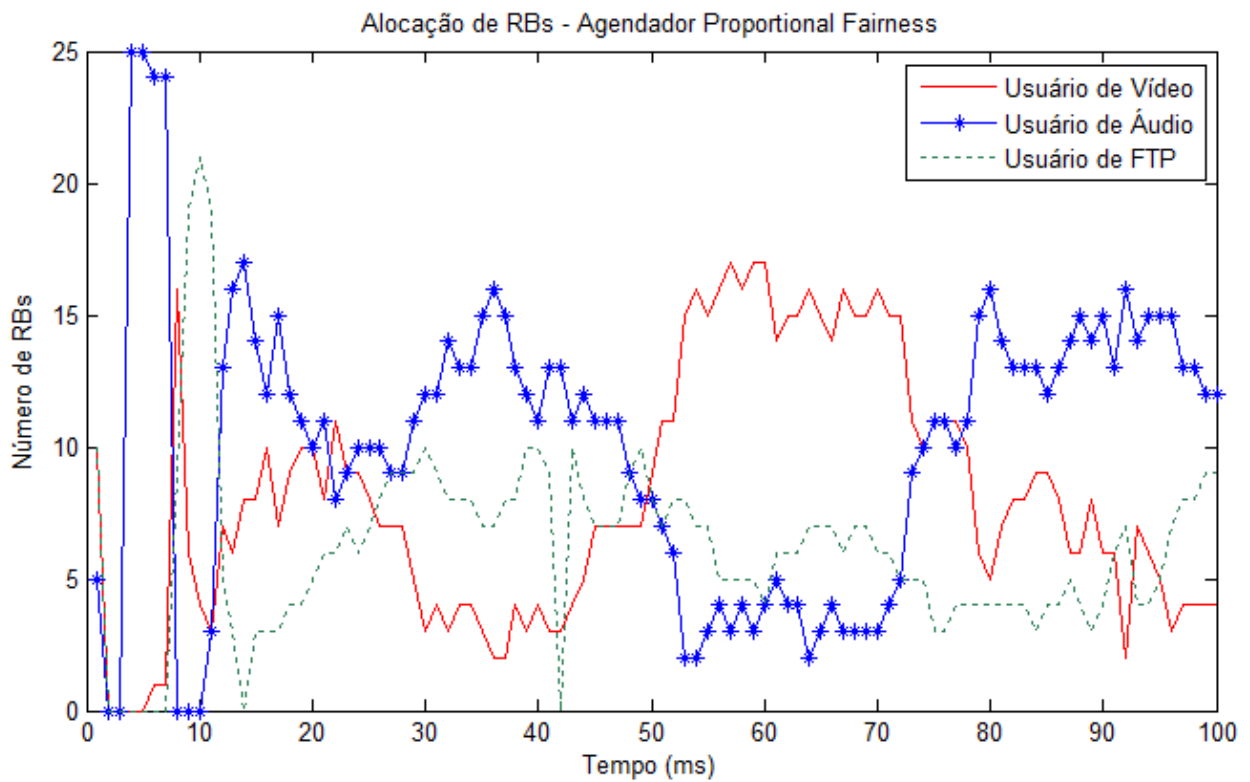


Fig. 20 - Alocação de blocos com o Agendador *Proportional Fairness*.

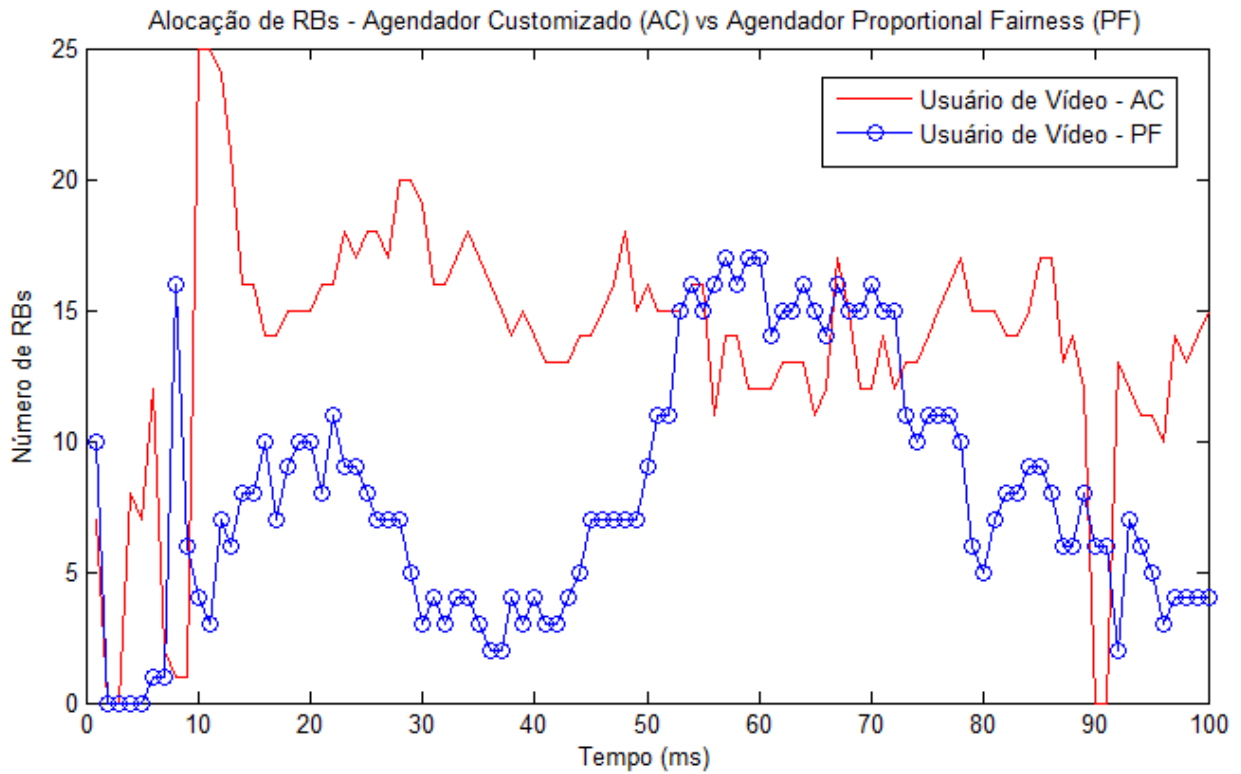


Fig. 21 - Comparação entre AC e PF para um usuário de vídeo.

5.3 Cenário 3: Solução do Estudo de Caso 2

O cenário três reflete a solução para o estudo de caso dois. As curvas representam a taxa de alocação de RBs, para os agendadores citados, considerando a nova estimativa dos elementos da matriz A_c (43). Foram considerados os usuários com de tráfegos de voz, transferência de arquivo e vídeo.

A Fig. 22 apresenta as curvas de a alocação de blocos para o Agendador Customizável.

A Fig. 23 apresenta a alocação de blocos com o agendador *Proportional Fairness*.

A Fig. 24 apresenta a comparação entre as técnicas Agendador Customizável e Agendador *Proportional Fairness* considerando o usuário de vídeo. A taxa de alocação da primeira técnica supera a segunda em praticamente 100% do tempo.

A Fig. 25 apresenta a comparação entre as curvas de alocação de recursos para os usuários de vídeo no estudo de caso dois e na solução consistente do estudo de caso 2. A escolha de novos elementos para matriz A_R , tornando-a consistente, proporcionou melhor desempenho ao Agendador Customizável.

A Fig. 26 apresenta as curvas de BLER do agendador proposto, enquanto que a Fig. 27 apresenta as curvas de BLER para o agendador *Proportional Fairness*. A Fig. 28 apresenta a comparação entre as curvas de BLER para o usuário de vídeo, que teve o seu tipo de tráfego priorizado pelas escolhas dos elementos das matrizes de comparação par-a-par. É possível verificar que o Agendador Customizável melhorou levemente a BLER

A Fig. 29 apresenta a comparação do BLER total da célula para o Agendador Customizável e o Agendador *Proportional Fairness*.

A Fig. 30 apresenta a comparação entre a vazão de dados global da célula em questão. Mesmo com o uso do método AHP, o agendador proposto se destaca no quesito vazão de dados total da célula.

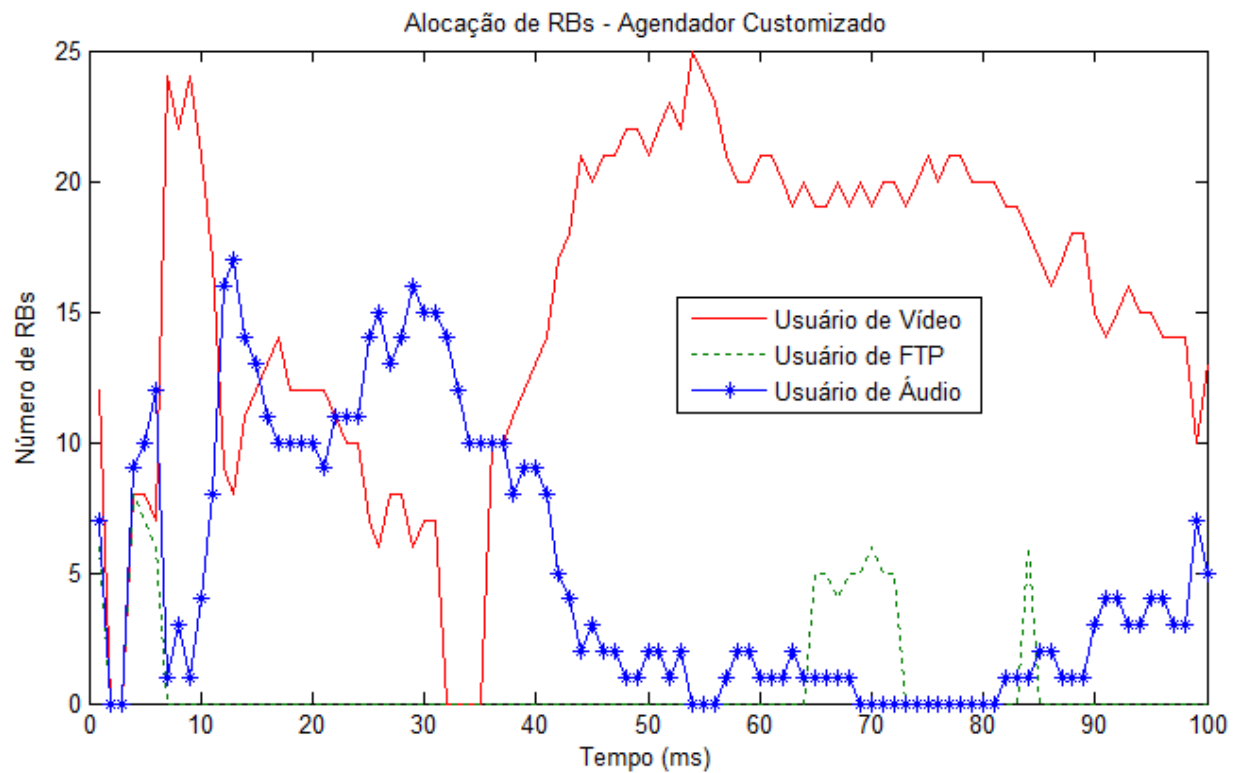


Fig. 22 - Alocação de blocos utilizando o Agendador Customizável.

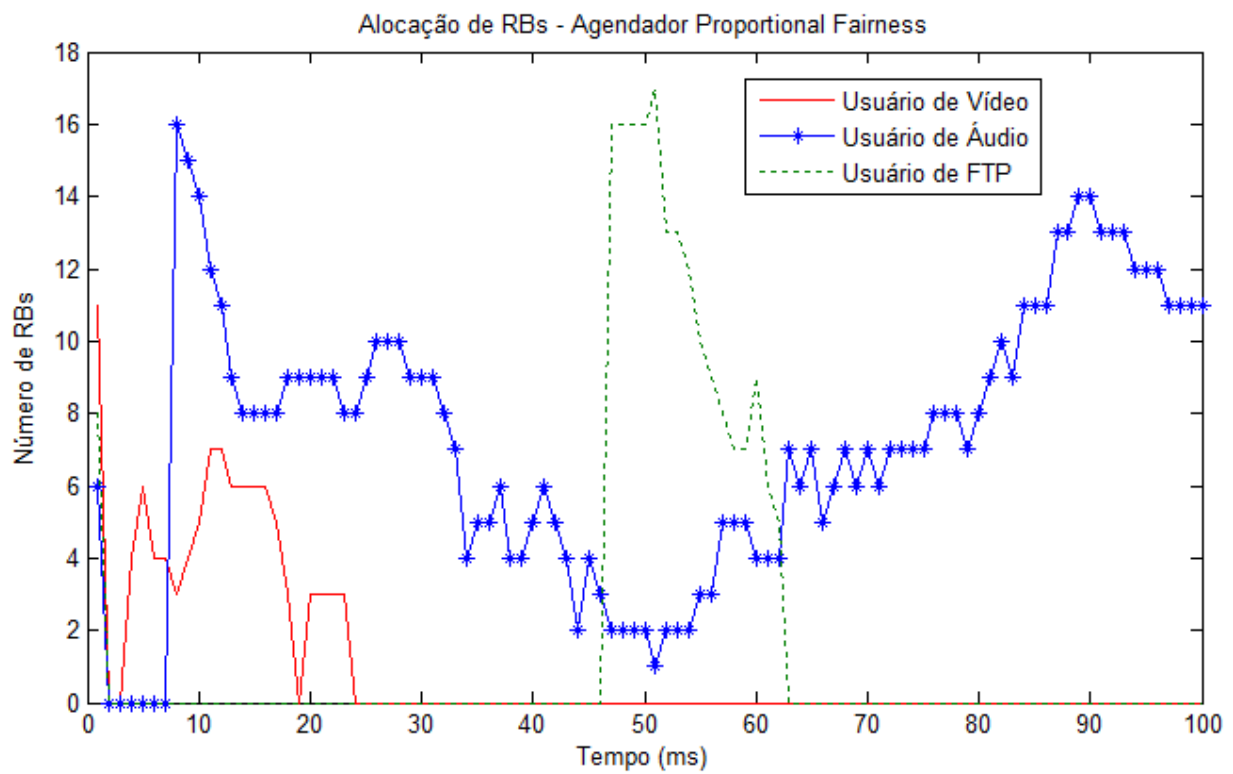


Fig. 23 - Alocação de blocos utilizando agendador *Proportional Fairness*.

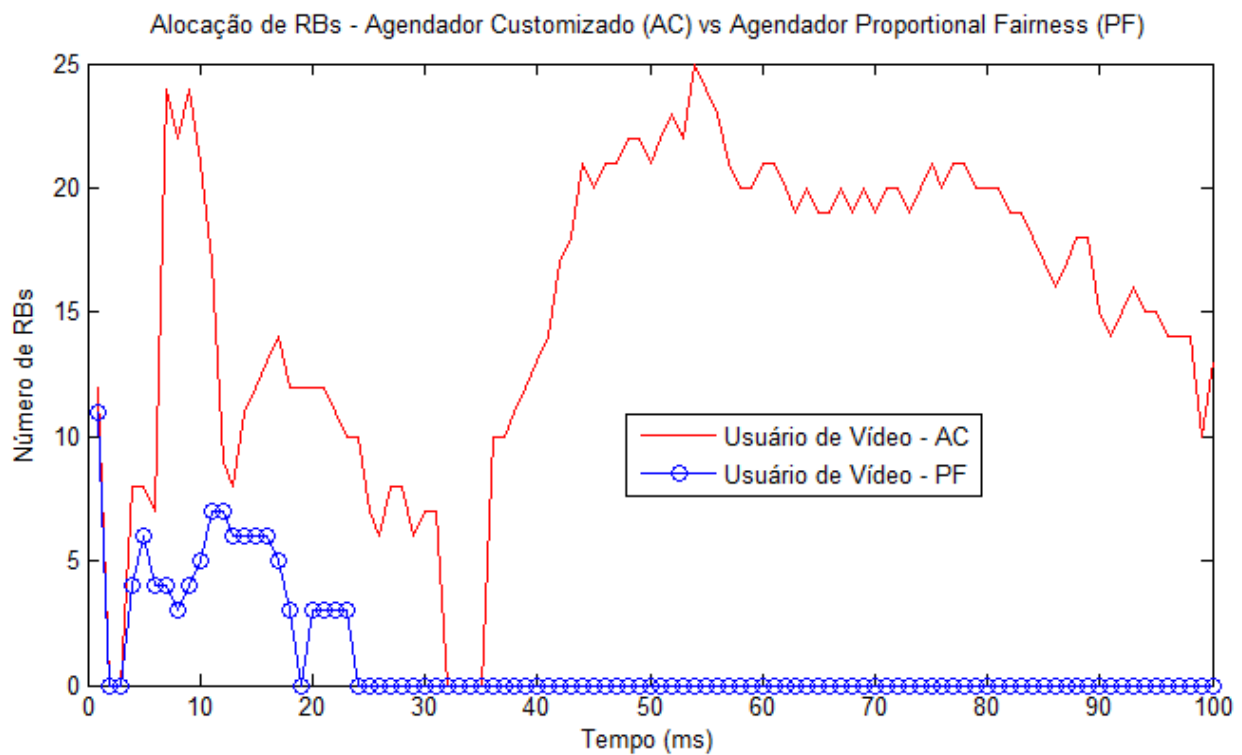


Fig. 24 - Comparação entre AC e PF para um usuário de vídeo.

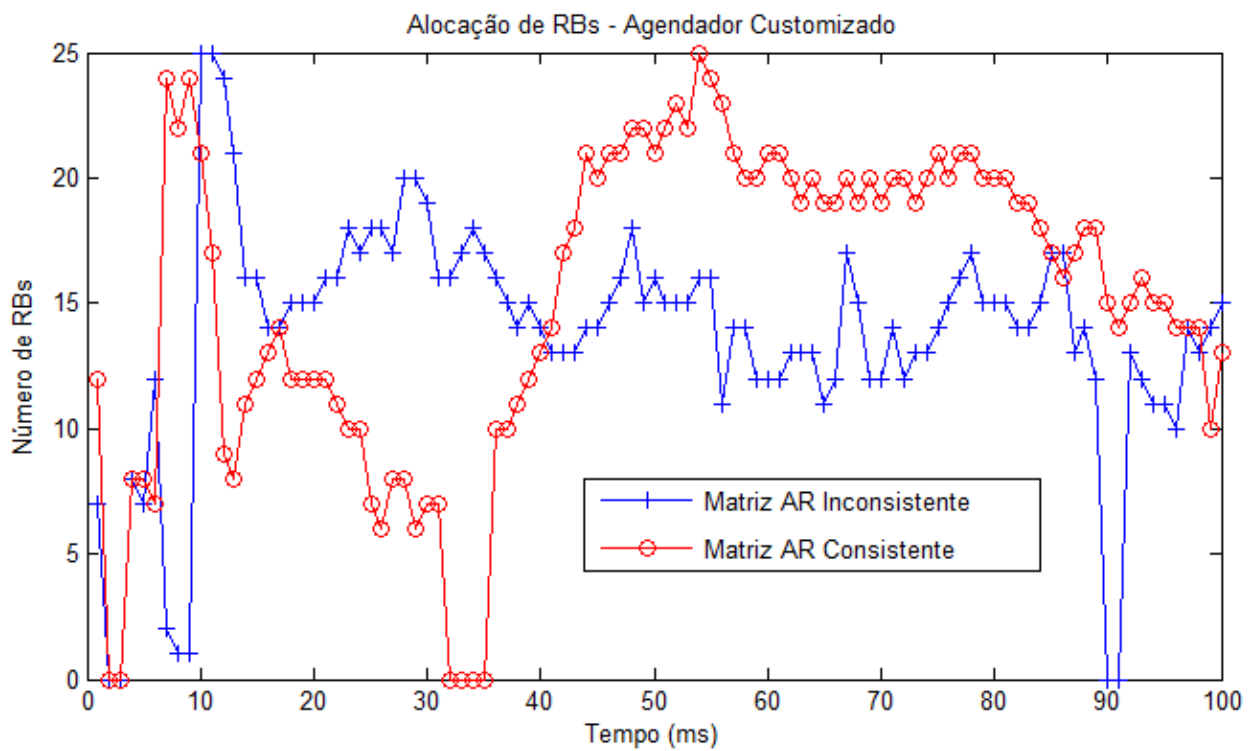


Fig. 25 – Comparação entre as curvas do Agendador Customizável para o estudo de caso 2 e sua solução.

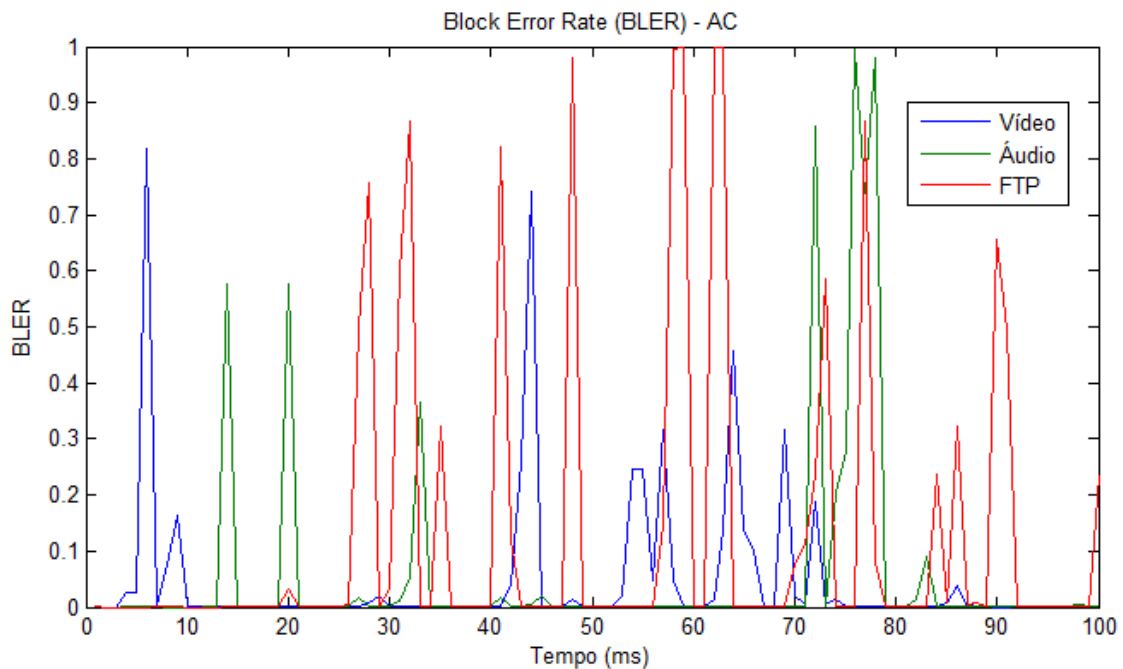


Fig. 26 – BLER do Agendador Customizável.

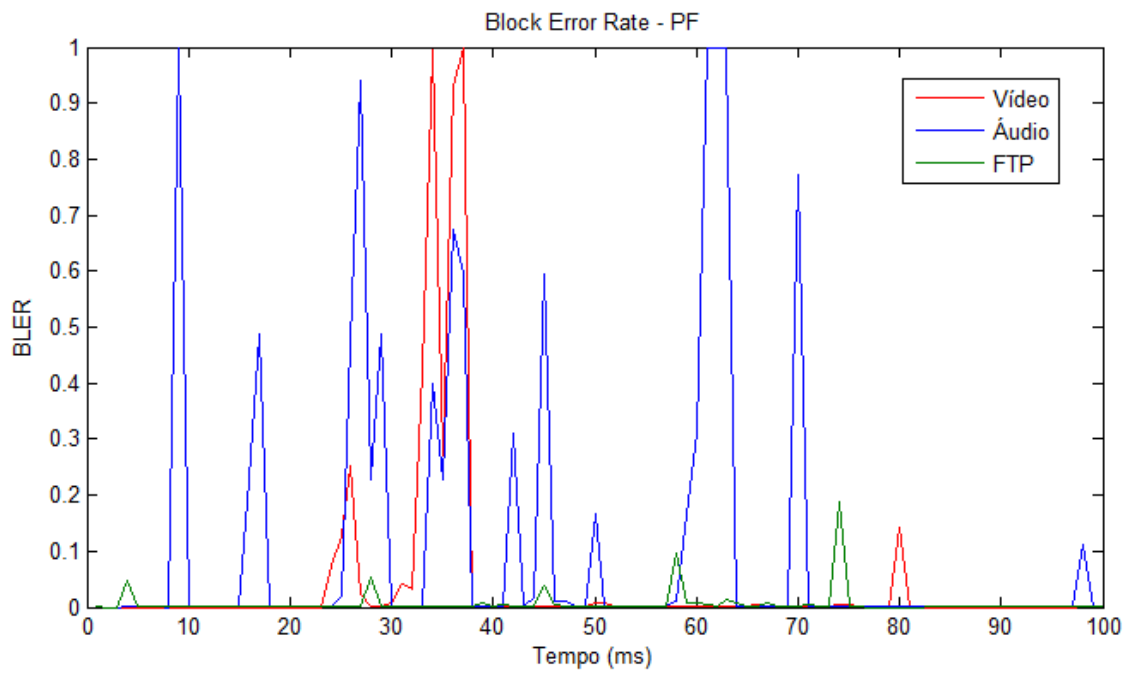


Fig. 27 – BLER do Agendador *Proportional Fairness*.

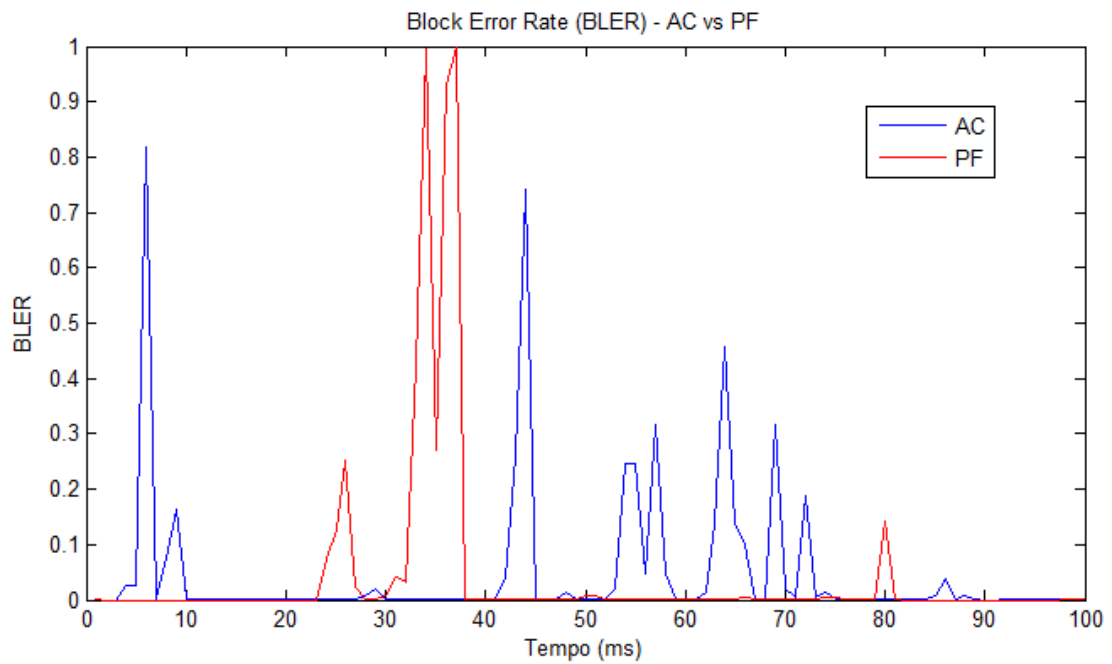


Fig. 28 – Comparação da BLER entre AC e PF.

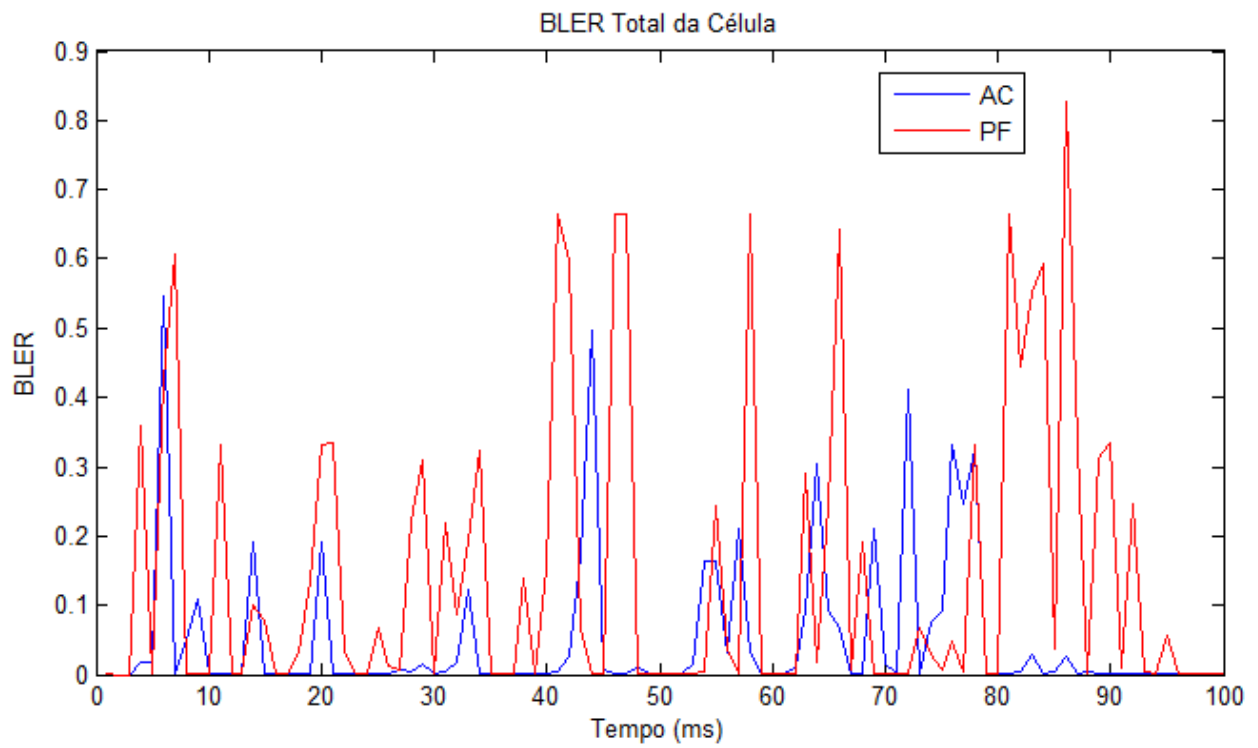


Fig. 29 - BLER Total da célula.

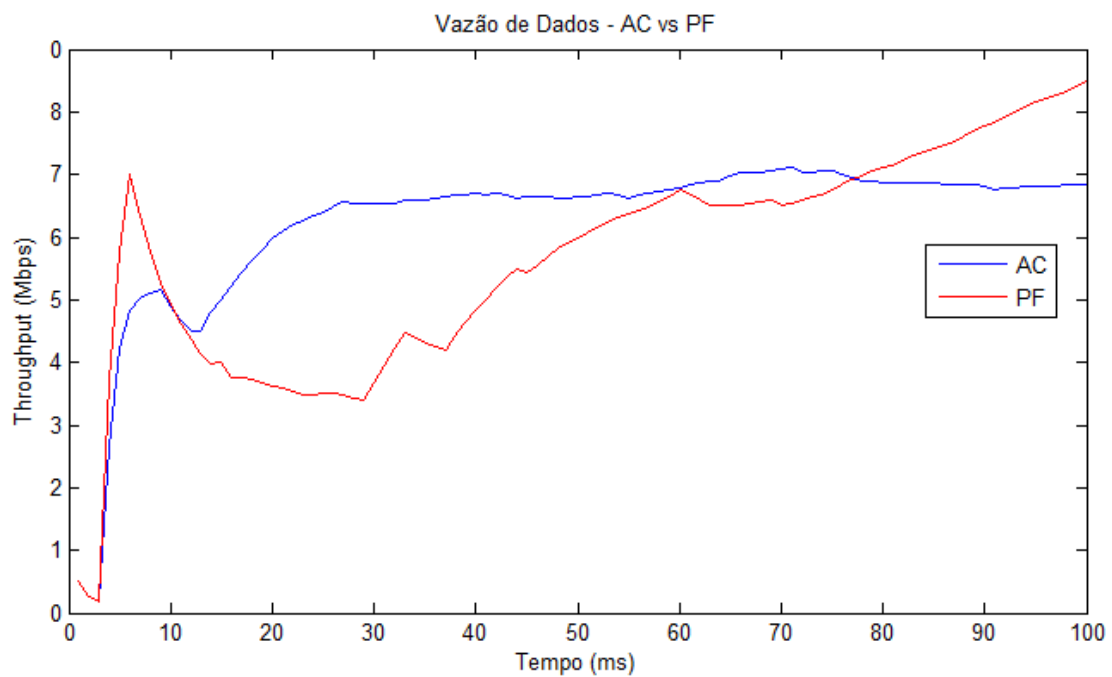


Fig. 30 – Comparação de vazão de dados.

Capítulo 6

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta tese apresenta um algoritmo de agendamento heurístico adaptativo customizável multiusuário para priorização de diferentes tráfegos de dados no canal de descida das redes LTE. O algoritmo de agendamento proposto é baseado no agendador *Proportional Fairness* e utiliza o método de tomada de decisão multicritério AHP, o qual incorpora os critérios de desempenho visando melhorar a alocação de recursos, de acordo com o tráfego do usuário. A utilização de técnicas de tomada de decisão para designar os critérios de desempenho se mostrou uma solução interessante para o tratamento diferencial do tráfego de vídeo.

A flexibilidade do agendador proposto neste trabalho é comprovada na escolha de diferentes critérios de desempenho ou parâmetros nas matrizes de comparação par a par. Com isso, é possível tornar o desempenho do agendador proposto similar ao desempenho de agendadores existentes, como por exemplo, *Proportional Fairness*, onde existe o compromisso entre justiça e equidade, *Round Robin*, onde todos os usuários são considerados iguais não levando em conta a qualidade do canal e *Best CQI*, onde apenas o usuários com boa qualidade de canal são agendados.

Uma aplicação importante do algoritmo é a possibilidade de melhorar a alocação de recursos para usuários de vídeo em aplicações que exigem tratamento especial como ensino a distância, *live streaming*, *video on demand*, jogos online, e outros. Naturalmente, os valores das matrizes de comparação determinam o aumento ou a diminuição dos recursos alocados.

Cabe ressaltar que o fato de existir uma matriz inconsistente no segundo cenário não impediu que o Agendador Customizável atingisse o melhor desempenho em termos de alocação de recursos de rádio. Porém, segundo [12], foi necessária uma nova estimativa dos valores da matriz em questão a fim de obter um nível de inconsistência aceitável.

Em termos de taxas alocação de blocos, é possível verificar que no primeiro cenário o número de blocos de alocação médio por milissegundo do usuário de vídeo utilizando o agendador Customizável (AC) foi 11. Já o agendador *Proportional Fairness* (PF) obteve média de 7.82 blocos alocados para o mesmo serviço. Isto apresenta uma taxa de alocação de 44% para o AC e 31.28% para o PF. Ou seja, o AC teve uma taxa de alocação de 12.72% maior que o PF. Portanto, é possível perceber que os outros usuários do AC foram penalizados em média de 6.36% para proporcionar o aumento de alocação para o usuário de vídeo. No segundo cenário, a média da taxa mínima garantida ao usuário de áudio e ao usuário de transferência de arquivo teve redução de 11.42%. Para o terceiro cenário esse número foi de 28,56%.

Desta forma, o trabalho proposto pode ser visto como o passo inicial para um sistema de malha fechada que garante percentuais mínimos e máximos de taxas.

A geração de tráfego do canal do usuário pelo simulador é baseada em um compromisso entre a memória do computador e a complexidade do cenário. Comprimentos muito longos podem exceder a capacidade de memória, prejudicando simulações.

Por fim, sugere-se que trabalhos futuros levem em consideração novos cenários:

- com tráfego demandado por veículos em alta velocidade;
- com mais usuários alocados à *eNodeB*;
- onde a soma da taxa de usuário é maior que a banda total;
- com novos critérios e mais níveis hierárquicos;
- com mudança dos elementos das matrizes de comparação de forma dinâmica, escolhidos sob medida a partir de informações de realimentação no sistema (malha fechada), levando em consideração as taxas mínimas alocadas e a vazão de dados, garantindo um desempenho confiável;
- com avaliação qualitativa a partir de parâmetros subjetivos;
- com simulações de diferentes algoritmos com mesmas condições de canal;
- com maior número de repetições de levantamento das curvas, para produzir estimativas de desempenho médias.

REFERÊNCIAS

- [1] 3 GPP TS 36.300, 2010, “3rd GENERATION PARTNERSHIP PROJECT”. 3GPP TS 36.300: Overall description – Stage 2”, Versão 8.12.0, mar. 2010.
- [2] MCQUEEN, D. “3GPP LTE – The Momentum Behind LTE Adoption”, IEEE Communications Magazine. February, 2009.
- [3] ZOU, W. Y.; WU, Y., “COFDM: An Overview”, IEEE Trans. On Broadcasting, Vol. 41, nº 1. Março, 1995.
- [4] GYASI-AGYEI, A., ‘Multiuser diversity based opportunistic scheduling for wireless data networks”, IEEE Communications Letters, vol. 9, nº. 7, pp. 670-672, Jul. 2005.
- [5] LEE, S. B. et al., “Proportional Fair Frequency-Domain Packet Scheduling for 3GPP LTE Uplink’. The 28th Conference on Computer Communications (INFOCOM), Rio de Janeiro, Brasil, Abril 20-25, 2009.
- [6] 3rd GENERATION PARTNERSHIP PROJECT., “3GPP Long Term Evolution: Release 8”. Disponível em: <<http://www.3gpp.org/LTE>>.
- [7] ZHAOHUA, Z., “Performance of the Frequency Domain Packet Scheduling for LTE Downlink”. 2nd International Conference on Future Computer and Communication (ICFCC), Wuhan, China, maio 21-24, 2010.
- [8] ROBSON, J., “The LTE/SAE trial initiative: taking LTE/SAE from specification to rollout”. IEEE Communications Magazine, pp. 82–88, abril, 2009.
- [9] RAMLI, H. A. M.; BASUKALA, R; SANDRASEGARAN, K.; PATACHAIANAND, R., “Performance of Well Known Packet Scheduling Algorithms in the Downlink 3GPP LTE System”. IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications (MICC), Kuala Lumpur, Malasia, dez. 15-17, 2009.
- [10] XUE, M.; SANDRASEGARAN, K.; RAMLI, H. A.; LIN, C., “Performance Analysis of Two Packet Scheduling Algorithms in Downlink 3GPP LTE System”, IEEE 24th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, abril 20-23, 2010
- [11] ALI, S.; ZEESHAN, M., “A Delay-Scheduler Coupled Game Theoretic Resource Allocation Scheme for LTE Networks”, Frontiers of Information Technology (FIT), pp. 14 – 19, Islamabad, Paquistão, dez. 19-21, 2011.

- [12] TAHA , H. A. Operations Research: An Introduction. 8^a Ed. Editora Pearson, 2008.
- [13] BALINT, C.; BUDURA, G.; MARZA, E., “Scheduling Techniques Evaluation in LTE Systems with Mixed Data Traffic”. 9th International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC), Timisoara, Romania, Nov 2010.
- [14] BASUKALA, R; RAMLI, H. A. M.; SANDRASEGARAN, K.; CHEN, L., “Impact of CQI Feedback Rate/Delay on Scheduling Video Streaming Services in LTE Downlink”, 12th IEEE International Conference on Communication Technology (ICCT), Nanjing, China, nov. 11-14, 2010.
- [15] SIMONSSON, A.; HAGERMAN, B.; CHRISTOFFERSSON, J.; KLOCKAR, L.; KOUTSIMANIS, C.; COSIMINI, P.R., “LTE Downlink Inter-Cell Interference Assessment in an Existing GSM Metropolitan Deployment”, 72nd IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), Ottawa, Canada, set. 6-9, 2010.
- [16] KAMPEAS, J., COHEN, A., GUREWITZ, O., “Capacity of Distributed Opportunistic Scheduling in Heterogeneous Networks”, 50th Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing (Allerton), Monticello, Illinois, EUA, out. 1-5, 2012.
- [17] WANG, M., Feng, C. e Zhang, T., “Analytic hierarchy process in load balancing for the multicast and unicast mixed services in LTE”, IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Shanghai, pp. 2735-2740, abril, 2012.
- [18] AKYILDIZ, H. A., Akkuzu, B., Hökelek, I. e Çırpan, H., “A LTE downlink scheduler with reconfigurable traffic prioritization”, IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), pp. 58-62, Odesa, Ucraina, maio 27-30, 2014.
- [19] COX, C, “An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications”, 1^a Ed. Editora Wiley, 2012.
- [20] SESIA, S., TOUFIK, I. e BAKER, M., “LTE - The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice”, 2^a Ed. Editora Wiley, 2011.
- [21] AGILENT Technologies, “LTE and the Evolution to 4G Wireless- Design and Measurement Challenges”, Publicação Agilent Technologies, 2009.
- [22] BERARDINELLI, G. et al., “OFDMA vs. SCFDMA: performance comparison in local area IMT-A scenarios”, Vol. 15, n° 5, pp. 64-72, 2008.

- [23] MORELLI, M., “Timing and frequency synchronization for the uplink of an OFDMA system”, IEEE Transactions on Communications, Vol. 52, nº 2, pp. 296-306, fev, 2004.
- [24] VAN DE BEEK, J. J. et al., “A time and frequency synchronization scheme for multiuser OFDM”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 17, nº 11, pp. 1900-1914, nov. 1999.
- [25] ZHANG, X. P.; RYU, H. G., “Suppression of ICI and MAI in SC-FDMA communication system with carrier frequency offsets”, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 56, nº 2, pp. 359-365, 2010.
- [26] LUO, H., “Quality-driven cross-layer optimized video delivery over LTE”, IEEE Communications Magazine, Vol. 48, nº 2, pp. 102-109, 2010.
- [27] SADIQ, B.; MADAN, R.; SAMPATH, A., “Downlink Scheduling for Multi-class Traffic in LTE”, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking - 3GPP LTE and LTE Advanced, Vol 9, nov. 2009.
- [28] WEI, Z., Xiangming, W., Baiquan, Z., Zhaoming, L., “A Cross-layer Self-optimized Algorithm for VOD in LTE-advanced based on Fuzzy Iteration”, 3th International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Washington, EUA, julho 25-28, 2010.
- [29] KIM, I.; HAN, Y.; CHUNG, H. K., “An Efficient Synchronization Signal Structure for OFDM Based Cellular Systems”, IEEE Trans. On Wireless Communications, Vol. 9, nº 1, jan. 2010.
- [30] JUNGnickel, V. et al., “Interference-aware scheduling in the multiuser MIMO-OFDM downlink” IEEE Communications Magazine, Vol. 47, nº 6, pp. 56-66, 2009.
- [31] VUKADINOVIC, V.; KARLSSON, G., “Video Streaming Performance Under Proportional Fair Scheduling”, IEEE Journal on Selected Areas in Communication. Vol 28, pp. 399-408, abril, 2010.
- [32] IKUNO, J. C.; WRULICH, M.; RUPP, M. “System Level Simulation of LTE Networks”, IEEE 71st Vehicular Technology Conference, Taipei, Taiwan, maio 2010.
- [33] [Online]. LTE Simulator. Disponível: <http://www.nt.tuwien.ac.at/ltesimulator/>.
- [34] DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKOLD, J. BEMING, P. “3G Evolution - HSPA and LTE for Mobile Broadband”, 1^a ed. Editora Academic Press, 2007.
- [35] FORMAN, E. H.; Gass, S. I., "The Analytical Hierarchy Process - An Exposition", Operations Research Journal, vol 49, pp. 469–486, julho 2001.

- [36] BHUSHAN, N.; RAI, K., “Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process”. Editora Springer, Londres, Jan. 2004
- [37] McCaffrey, J., "Test Run: The Analytic Hierarchy Process", *MSDN Magazine*, junho, 2005.
- [38] COVER, T. M., THOMAS, J. A., “Elements of Information Theory (Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing)”, Editora Wiley-Interscience, agosto, 1991.
- [39] Technical Specification Group RAN, “E-UTRA; physical layer procedures,” 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Tech. Rep. TS 36.213, Mar. 2009.