

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE INFORMÁTICA
BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

DIEGO DONIZETI DE OLIVEIRA PERICO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE ALGORITMOS DE
ESCALONAMENTO PARA REDES LTE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2017

DIEGO DONIZETI DE OLIVEIRA PERICO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE ALGORITMOS DE
ESCALONAMENTO PARA REDES LTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação, do Departamento Acadêmico de Informática, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Augusto Foronda

PONTA GROSSA

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa

Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Informática
Bacharelado em Ciência da Computação



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE ALGORITMOS DE ESCALONAMENTO PARA REDES LTE

DIEGO DONIZETI DE OLIVEIRA PERICO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 02 de junho de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Augusto Foronda
Orientador

Prof^a. Dr^a. Tânia Lúcia Monteiro
Membro titular

Prof. Dr. Kleber Horykawa Nabas
Membro titular

Prof. Dr. Ionildo José Sanches
Responsável pelo Trabalho de Conclusão
de Curso

Prof. Dr. Erikson Freitas de Moraes
Coordenador do curso

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, aos meus pais por me apoiarem e contribuírem para que eu chegasse até aqui.

Agradeço também o Prof. Augusto Foronda, por sua paciência e orientação neste trabalho.

Aos meus professores e amigos da UTFPR - PG, por todo conhecimento compartilhado, que contribuíram ricamente para minha formação pessoal e profissional, muito obrigado.

RESUMO

PERICO, D.D.O. **Análise de Desempenho de Algoritmos de Escalonamento para Redes LTE.** 2017. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Ciência da Computação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

A Internet possibilitou a interconexão do globo através da intensa troca de dados. Com o surgimento dos smartphones, a Internet móvel passou a demandar conexões mais rápidas e com melhor qualidade para prover os serviços disponíveis atualmente, tais como streaming de multimídia e jogos online. Novas tecnologias surgiram para suprir essa demanda e o 4G é o atual padrão para Internet móvel que utiliza a tecnologia LTE. Os algoritmos escalonadores de pacotes são responsáveis por distribuir os recursos disponíveis na rede para os usuários nela conectados. O estudo destes algoritmos é de extrema importância para que os recursos sejam providos de forma otimizada, contribuindo para o desempenho da rede.

Palavras-chave: Long Term Evolution. 4G. Escalonadores de Pacote. Telefonia Móvel.

ABSTRACT

PERICO, D.D.O. **Performance Analysis of LTE Network Scheduling Algorithms.** 2017. 74 p. Work of Conclusion Course (Graduation in Computer Science) – Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2017.

The Internet has made possible interconnected world through intense data exchange. With the continuous rise of smartphones, currently available services such as multimedia streaming and games demand faster and better mobile Internet connections, so these services can be reliably delivered to users. New technologies have emerged to meet this demand including the LTE enabled 4G standard. The package scheduling algorithms are responsible for distributing network resources to connected users. Studying these algorithms is crucial in order to optimally allocate network resources and increase overall network performance.

Keywords: Long Term Evolution. 4G. Packet Schedulers. Mobile.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Relatório dos Assinantes de Conexões Móveis	13
Figura 2 - Modulação FDMA	18
Figura 3 – Modulação TDMA.....	19
Figura 4 – Modulação OFDMA.....	21
Figura 5 - Modulação SC-FDMA	22
Figura 6 - Arquitetura da rede LTE.....	23
Figura 7 - Modo de transmissão do FDD	25
Figura 8 - Estrutura do <i>frame</i> FDD.....	25
Figura 9 - Estrutura da alocação dos recursos para <i>downlink</i>	26
Figura 10 – Modo de transmissão do TDD.....	27
Figura 11 - Estrutura do <i>frame</i> TDD	27
Figura 12 – Alocação dos recursos para os usuários pelo RR.....	29
Figura 13 - Fluxograma do RR	29
Figura 14 - Fluxograma do PF.....	31
Figura 15 - Fluxograma do MLWDF	32
Figura 16 - Tela inicial do simulador.....	35
Figura 17 - Topologia da rede LTE no simulador	37
Figura 18 - Diagrama de classes do simulador	38
Figura 19 - Exemplo de <i>frame</i> TDD alocado	41
Figura 20 - Quantidade de vezes que cada usuário foi selecionado no RR.....	43
Figura 21 - Quantidade de pacotes transmitidos por cada usuário no RR	44
Figura 22 - Quantidade de vezes que cada usuário foi selecionado no PF	50
Figura 23 - Quantidade de pacotes transmitidos por cada usuário no PF.....	51
Figura 24 - Quantidade de vezes que cada usuário foi selecionado no MLWDF	58
Figura 25 - Quantidade de pacotes transmitidos por cada usuário no MLWDF	58
Figura 26 - Canal de transmissão dos usuários no RR	59
Figura 27 - Canal de transmissão dos usuários no PF.....	60
Figura 28 - Canal de transmissão dos usuários no MLWDF	60
Figura 29 - Taxas média de transmissão dos usuários no PF	61
Figura 30 - Taxas média de transmissão dos usuários no MLWDF	62
Figura 31 - <i>Delay</i> dos usuários no RR	63
Figura 32 - <i>Delay</i> dos usuários no PF	64
Figura 33 – <i>Delay</i> dos usuários no MLWDF.....	64
Figura 34 - <i>Delay</i> médio dos usuários no RR.....	65
Figura 35 - <i>Delay</i> médio dos usuários no PF	65
Figura 36 – <i>Delay</i> médio dos usuários no MLWDF	66
Figura 37 - <i>Throughput</i> dos usuários no PF.....	67
Figura 38 – <i>Throughput</i> dos usuários no PF	67

Figura 39 - <i>Throughput</i> médio dos usuários no MLWDF.....	68
Figura 40 - <i>Throughput</i> médio dos usuários no RR.....	68
Figura 41 – <i>Throughput</i> médio dos usuários no PF	69
Figura 42 – <i>Throughput</i> médio dos usuários no MLWDF	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados utilizados na realização da simulação.....	34
Tabela 2 - Taxas de transmissão média inicial.....	35
Tabela 3 - Ordem de seleção dos usuários no RR.....	42
Tabela 4 - Valores de $W(i)$ obtidos por U1 no processo de seleção do PF.....	45
Tabela 5 - Valores de $W(i)$ obtidos por U2 no processo de seleção do PF.....	45
Tabela 6 - Valores de $W(i)$ obtidos por U3 no processo de seleção do PF.....	46
Tabela 7 - Valores de $W(i)$ obtidos por U4 no processo de seleção do PF.....	46
Tabela 8 - Valores de $W(i)$ obtidos por U5 no processo de seleção do PF.....	47
Tabela 9 - Valores de $W(i)$ obtidos por U6 no processo de seleção do PF.....	47
Tabela 10 - Valores de $W(i)$ obtidos por U7 no processo de seleção do PF.....	48
Tabela 11 - Valores de $W(i)$ obtidos por U8 no processo de seleção do PF.....	48
Tabela 12 - Valores de $W(i)$ obtidos por U9 no processo de seleção do PF.....	49
Tabela 13 - Valores de $W(i)$ obtidos por U10 no processo de seleção do PF.....	49
Tabela 14 - Ordem de seleção dos usuários no PF.....	50
Tabela 15 - Valores de $w(i)$ obtidos por U1 no processo de seleção do MLWDF.....	52
Tabela 16 - Valores de $w(i)$ obtidos por U2 no processo de seleção do MLWDF.....	52
Tabela 17 - Valores de $w(i)$ obtidos por U3 no processo de seleção do MLWDF.....	53
Tabela 18 - Valores de $w(i)$ obtidos por U4 no processo de seleção do MLWDF.....	53
Tabela 19 - Valores de $w(i)$ obtidos por U5 no processo de seleção do MLWDF.....	54
Tabela 20 - Valores de $w(i)$ obtidos por U6 no processo de seleção do MLWDF.....	54
Tabela 21 - Valores de $w(i)$ obtidos por U7 no processo de seleção do MLWDF.....	55
Tabela 22 - Valores de $w(i)$ obtidos por U8 no processo de seleção do MLWDF.....	55
Tabela 23 - Valores de $w(i)$ obtidos por U9 no processo de seleção do MLWDF.....	56
Tabela 24 - Valores de $w(i)$ obtidos por U10 no processo de seleção do MLWDF.....	56
Tabela 25 - Ordem de seleção dos usuários no MLWDF.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1G	Primeira Geração
2G	Segunda Geração
3G	Terceira Geração
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	Quarta Geração
CP	<i>Cyclic Prefix</i>
DwPTS	<i>Downlink Pilot Timeslot</i>
E-UTRAN	<i>Evolved - UTRANUE User Equipment</i>
EDGE	<i>Enhanced Data Rates For GSM Evolution</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
GP	<i>Guard Period</i>
GPRS	<i>General Packet Radio System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile</i>
HSDPA	<i>High-Speed Downlink Packet Access</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>
HSUPA	<i>High-Speed Uplink Packet Access</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISP	<i>Internet Service Provider</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MLWDF	<i>Modified Largest Weighted Delay First</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>
P-GW	<i>Packet Data Network – GateWay</i>
PCRF	<i>Policy and Charging Rules Function</i>
PF	<i>Proportional Fair</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RB	<i>Resource Block</i>
RE	<i>Resource Element</i>
RR	<i>Round-Robin</i>
S-GW	<i>Serving Gateway</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>

TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UpPTS	Uplink Pilot Timeslot
VoIP	Voice over Internet Protocol
eNodeB	Enhanced NodeB

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
1.2 JUSTIFICATIVA.....	15
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1 HISTÓRICO DOS PADRÕES DE TELEFONIA MÓVEL.....	17
2.2 LTE	20
2.2.1 Arquitetura da Rede LTE	22
2.2.3 Algoritmos de Escalonamento.....	28
2.2.3.1 <i>Round-Robin</i>	28
2.2.3.2 <i>Proportional Fair</i>	29
2.2.3.3 <i>Modified Largest Weighted Delay First</i>	31
3 DESENVOLVIMENTO.....	33
3.1 SIMULADOR.....	36
3.1.1 DIAGRAMA DE CLASSES DO SIMULADOR	37
3.1.2 Implementação do RR.....	38
3.1.3 Implementação do PF	39
3.1.4 Implementação MLWDF.....	39
3.1.5 Geração do <i>Frame</i> TDD.....	40
4 RESULTADOS	42
4.1 SELEÇÃO DOS USUÁRIOS.....	42
4.1.1 RR.....	42
4.1.2 PF.....	44
4.1.3 MLWDF	51
4.2 CANAL DE TRANSMISSÃO DOS USUÁRIOS.....	59
4.3 TAXA MÉDIA DE TRANSMISSÃO (R)	61
4.4 <i>DELAY</i>	62
4.5 <i>THROUGHPUT</i>	66
5 CONCLUSÃO.....	70
5.1 TRABALHOS FUTUROS	70
REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

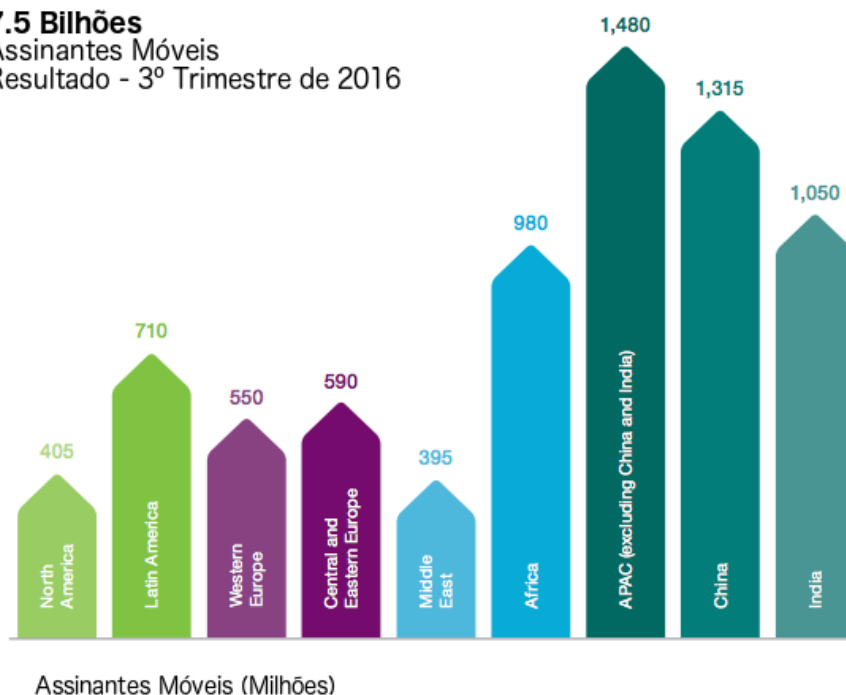
O avanço tecnológico possibilitou a interconexão de diferentes partes do globo por meio da intensa troca de dados através da Internet. Com o passar dos anos os aparelhos de telefonia móvel difundiram-se nesse cenário devido a sua fácil portabilidade. Originalmente, o principal objetivo dos celulares era o tráfego de voz e o envio de mensagens de texto *Short Message Service* (SMS) (FILHO, 2014). Entretanto, com o passar dos anos os aparelhos celulares passaram a contar com acesso à Internet aumentando expressivamente o número de usuários, segundo o relatório de mobilidade móvel da Ericsson mostrado na Figura 1, o número de assinantes de dados móveis está atualmente por volta dos 7,5 bilhões.

Figura 1 - Relatório dos Assinantes de Conexões Móveis

7.5 Bilhões

Assinantes Móveis

Resultado - 3º Trimestre de 2016



Fonte: Adaptado de Ericsson (2016)

O consumo de dados não se restringiu apenas a troca de mensagens de texto. Com o surgimento dos smartphones e tablets uma série de aplicações com funcionamento online foram disponibilizadas, tais como serviços de *streaming* de multimídia, jogos *online*, acesso às redes sociais. Com isso a demanda por conexões cada vez mais rápidas e com maior qualidade se tornou de grande importância (MATOS et al., 2012).

Para suprir as necessidades da sociedade digital, novas tecnologias para as redes móveis foram desenvolvidas tais como o 3G (3a geração) e o 4G (4a geração). O 3G é um padrão de conexão banda larga para redes móveis com potencial de taxa de transmissão de até 14 Mbps de *download*. Embora essa tecnologia possua uma boa velocidade, não está sendo suficiente para atingir a exigência de tráfego da atualidade, assim, surgiu a necessidade de melhores conexões para solucionar esse problema (MAZZONI, 2014).

O 4G é o novo padrão de conexão móvel e uma das tecnologias disponibilizadas por esse padrão é o *Long Term Evolution* (LTE), provendo altas taxas de transmissão em torno de 100 Mbps de *downlink* e 50 Mbps de *uplink*. Segundo Ericsson (2016), atualmente existem por volta de 1,7 bilhões de usuários utilizando o LTE. A velocidade alcançada por esta tecnologia assemelha-se a banda larga cabeada residencial.

A rede LTE utiliza comutação por pacote no compartilhamento dos recursos disponíveis, por exemplo, a Internet. O processo de distribuição de recursos entre os usuários é realizado por meio de algoritmos escalonadores de pacote. Dentre os algoritmos existentes na literatura estão o *Round-Roubin* (RR), *Proportional Fair* (PF) e o *Modified Largest Weighted Delay First* (MLWDF), cada qual com uma política de distribuição de recursos diferentes.

Analisar o desempenho desses escalonadores é de extrema importância para que os recursos sejam providos de maneira otimizada, contribuindo na qualidade do serviço. A partir disso, o presente trabalho busca realizar uma análise comparativa de desempenho entre os três algoritmos de escalonamento citados anteriormente, que são empregados em redes LTE. Para a realização desta análise foi necessário o desenvolvimento de um simulador computacional contendo os algoritmos escalonadores que serão comparados, no qual foram avaliados em um ambiente de teste específico.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são descritos a seguir. A seção 1.2.1 descreve o objetivo geral do trabalho e seção 1.2.2 descreve os objetivos específicos do trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar uma análise de desempenho de algoritmos escalonadores de pacotes utilizados em redes de banda larga móvel LTE.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são descritos a seguir:

- Estudar o algoritmo RR;
- Estudar o algoritmo PF;
- Estudar o algoritmo MLWDF;
- Implementar o simulador com os algoritmos estudados;
- Extrair os resultados de *delay* e *throughput*;
- Analisar o desempenho de cada escalonador.

1.2 JUSTIFICATIVA

O crescente aumento dos assinantes de conexões móveis gerou um expressivo compartilhamento de dados entre os usuários, com isso a exigência de um bom desempenho da rede para a disponibilização dos recursos se tornou relevante. Analisar o desempenho de algoritmos escalonadores de pacote é de grande importância para as redes de telefonia móvel, principalmente para que o compartilhamento de recursos que exigem altas taxas de transmissão, como dados de multimídia e jogos *online*, sejam realizados de forma otimizada, disponibilizando um serviço de qualidade para o usuário.

Cada escalonador de pacote possui um desempenho diferente em relação a determinada métrica utilizada na rede, por exemplo, um tipo de escalonador pode aumentar o *throughput* da rede (taxa de transferência), enquanto outro reduz o *delay* (atraso de transmissão). Cada tipo de aplicação utiliza um tráfego diferente, ou seja, precisa de desempenho diferenciado conforme a métrica, o que é determinado pelo escalonador.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em 5 capítulos. No capítulo 2 está o referencial teórico utilizado como base para a realização do trabalho. No capítulo 3 está o desenvolvimento do trabalho, trazendo a implementação do simulador computacional. No capítulo 4 estão os resultados obtidos através da realização das simulações, e por fim, o capítulo 5 contém a conclusão e os trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

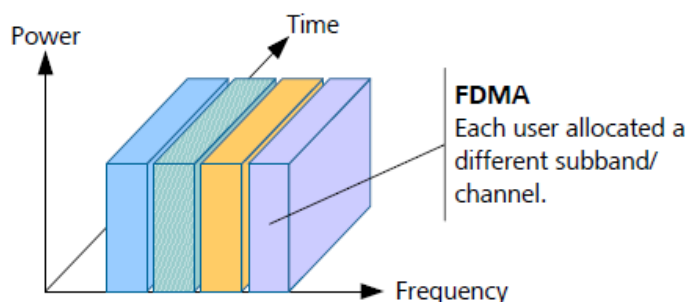
Este capítulo traz um levantamento histórico das gerações de telefonia móvel difundidas no mercado, com foco na quarta geração, no qual está o LTE, tecnologia em que serão voltados os estudos para a realização deste trabalho. Além disso, são tratados o funcionamento do LTE, arquitetura da rede, características físicas para transmissão e os algoritmos escalonadores de pacotes utilizados pelo LTE.

2.1 HISTÓRICO DOS PADRÕES DE TELEFONIA MÓVEL

A rede de telefonia móvel é composta por regiões geograficamente distribuídas, cada região é representada por uma célula na arquitetura, a partir disso o termo celular foi popularizado para definir esse modelo de comunicação (TANENBAUM; WETHERALL, 2011). Originalmente os aparelhos celulares foram projetados apenas para o tráfego de voz, assim, esse padrão foi definido como 1G (primeira geração). A tecnologia de modulação adotada pelo 1G era a *Frequency Division Multiple Access* (FDMA), esse método possibilita a divisão da banda de frequência em canais, como mostrado na Figura 2. Um canal pode ser alocado para apenas um usuário durante determinado instante de tempo, por exemplo uma chamada de voz (MENDES, 2014).

Figura 2 - Modulação FDMA

Frequency Division Multiple Access

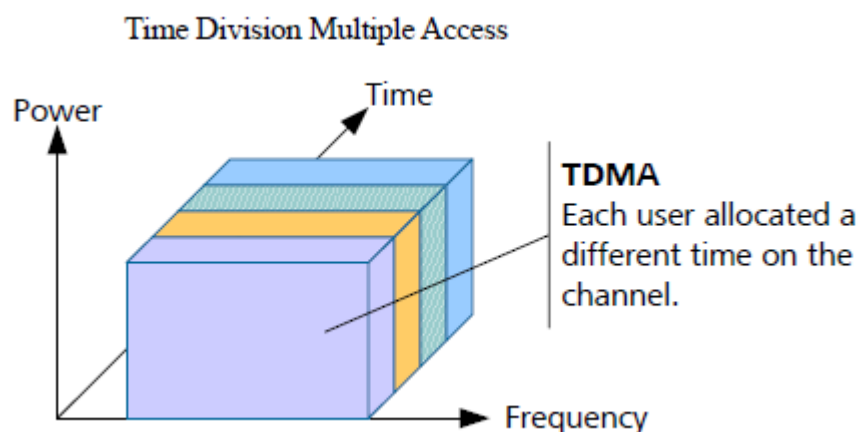


Fonte: Adaptado de Sivakumar (2016)

O sinal de transmissão era analógico estando mais suscetível a sofrer atenuações e interferências ao longo do meio físico de transmissão, deteriorando a qualidade da comunicação. A comutação utilizada era por circuito, no qual os recursos necessários para comunicação são reservados durante o período da sessão entre o emissor e o receptor. A capacidade de transmissão do 1G era baixa e possuía alto custo (KUROSE, 2011).

Com a expansão da telefonia móvel e o desenvolvimento de diferentes sistemas celulares, houve a necessidade de criar um novo padrão, o 2G (segunda geração). O objetivo inicial do 2G era também o tráfego de voz, contudo o serviço foi estendido para troca de dados (MENDES, 2014). O *Global System for Mobile* (GSM), a tecnologia utilizada por esse padrão, foi desenvolvida na Europa no, qual foi padronizado pela *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) (PAUL; SHAH, 1997). O GSM possibilitou a migração do sistema analógico para o digital, melhorando a qualidade do serviço. Essa tecnologia utiliza a modulação *Time Division Multiple Access* (TDMA), permitindo que os recursos de rádio sejam compartilhados entre os múltiplos usuários da rede, isso torna-se possível pois um canal de frequência pode ser segmentado em vários intervalos de tempo para transmissão, como é mostrado na Figura 3 (KUROSE, 2011).

Figura 3 – Modulação TDMA



Fonte: Adaptado de Sivakumar (2016)

O serviço de *roaming* de dados foi implementado no 2G, permitindo a comunicação de usuários de diferentes operadoras, a partir disso, um novo serviço começou a ser disseminado, o SMS, provendo a troca de mensagens de texto entre os usuários. A partir da troca de SMS, o tráfego de dados foi difundindo na telefonia móvel, o padrão 2.5 (2.5ª geração), foi uma evolução do 2G, no qual passou a suportar a troca de dados através da Internet, contudo com uma baixa taxa para transmissão de 144 Kbps. O acesso à Internet era realizado a partir do *Internet Service Provider* (ISP), que é o provedor que possibilita o usuário conectar-se à Internet (KUROSE, 2011).

A comutação que antes era feita por circuito passou a ser por pacotes, para melhorar a troca de dados outras novas tecnologias foram integradas ao padrão 2.5, dentre elas estão o *General Packet Radio System* (GPRS) e o *Enhanced Data Rates For GSM Evolution* (EDGE). O GPRS possibilita ao usuário enviar pacotes dinamicamente não exigindo que uma conexão dedicada seja mantida para o tráfego de dados, ou seja, o canal é ocupado apenas no momento da transmissão, no restante do tempo fica disponível para ser compartilhado, isso permitiu aumentar o número de usuários conectados simultaneamente na rede. Em seguida foi implementada a tecnologia EDGE, contribuindo para o aumento na velocidade de transmissão do GPRS (FILHO, 2014).

Com o aumento do envio de dados e o surgimento dos *smartphones* contendo aplicações com funcionamento *online*, houve a necessidade da definição de um novo padrão. O 3G (terceira geração) foi especificado pela *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), órgão responsável por definir padrões na área de

telecomunicações para telefonia móvel, esse padrão utiliza a tecnologia *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS), considerada uma evolução do GSM. Esta implementa a modulação FDMA/TDMA, contudo é necessário separar a rede de dados da rede de tráfego de voz (FILHO, 2014).

O 3G utiliza o *High-Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) e o *High Speed Uplink Packet Access* (HSUPA) para a transmissão dos dados, suportando o endereçamento *Internet Protocol* (IP) e com isso melhorando o acesso à Internet e o funcionamento de aplicações multimídia. Cabe a interface aérea da rede o envio dos pacotes. O tráfego é mensurado em termos de *downlink* (recebimento dos dados) e *uplink* (envio dos dados) (MENDES, 2014).

Para aumentar o tráfego de dados foi desenvolvida uma nova tecnologia, o *High Speed Packet Access* (HSPA) baseada na UMTS, o núcleo principal da rede não sofreu alterações, contudo foi melhorada a interface de rádio, contribuindo na velocidade da rede. A taxa de transferência disponibilizada pelo HSPA tem potencial de até 14 Mbps de *downlink* e de 5,76 Mbps para *uplink* (MELO, 2010).

2.2 LTE

A disseminação dos *smartphones* provocou crescente aumento no número de usuários embalado pelo alto consumo de dados utilizados pelas aplicações suportadas por estes aparelhos, tais como *streaming* de multimídia, jogos *online* e navegação em redes sociais, com isso, a exigência por conexões mais rápidas e com melhor qualidade se tornou de extrema importância. O 4G (quarta geração) é o novo padrão de banda larga para rede móvel, foi padronizado pela 3GPP com objetivo de prover maiores taxas de transmissão e largura de banda. Uma das tecnologias disponibilizadas pelo 4G é o LTE, provendo conexões com potencial para superar 100 Mbps de *downlink* e 50 Mbps de *uplink*, taxas de transmissão similares as redes cabeadas residenciais. Além disso, o LTE é compatível com as gerações anteriores, sejam padronizadas pela 3GPP ou não, isso contribui para o mantimento da comunicação dos usuários que utilizam aparelhos com transmissão baseado nas tecnologias anteriores (FILHO, 2014).

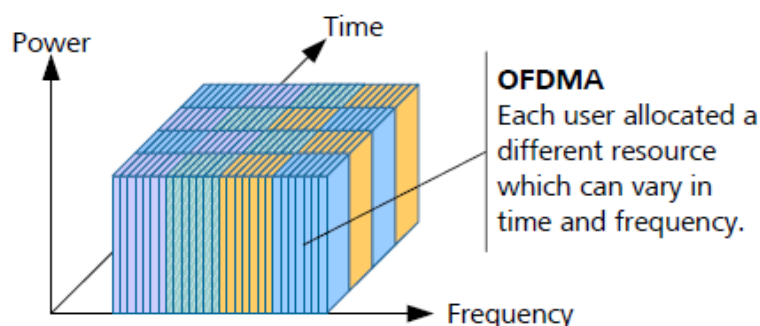
O LTE implementa a comutação por pacotes em uma rede totalmente IP, logo a maneira de trafegar voz foi alterada. Esse processo é realizado por meio da

tecnologia *Voice over Internet Protocol* (VoIP), popularmente conhecida como voz sobre IP, em que os dados de voz são encapsulados em pacotes e transmitidos pela rede, isso contribui para integração dos serviços de multimídia (FILHO, 2014).

Os métodos de modulação implementados na interface sem fio do LTE são dois, sendo eles: *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access* (OFDMA) e o *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA), ambos possuem propósitos distintos para transmissão.

O OFDMA é responsável por dividir a banda em várias subportadoras matematicamente ortogonais, que serão compartilhadas por múltiplos usuários, como mostrado na Figura 4. Este método de modulação foi baseado na tecnologia OFDM, contudo, esta possibilita a alocação de apenas um usuário por subportadora e que são compartilhados por intervalos de tempo. O propósito da utilização do OFDMA é para o tráfego de dados de *downlink*, ou seja, envio de dados da estação de transmissão para o dispositivo móvel do usuário (MANNANI, 2012).

Figura 4 – Modulação OFDMA
Orthogonal Frequency Division Multiple Access



Fonte: Adaptado de Sivakumar (2016)

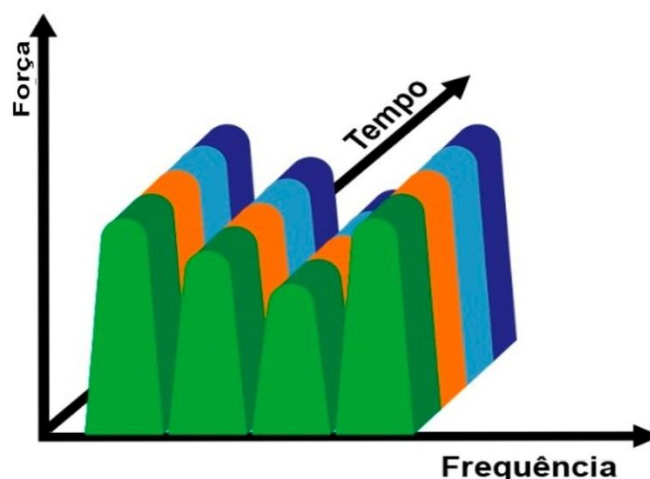
O dados trafegados utilizando a modulação OFDMA são separados individualmente e simultaneamente nas diferentes subportadoras em baixa velocidade, no qual cada dado pode ser extraído individualmente, a mensagem final é a obtida pela junção dos dados recebidos das subportadoras, contudo em alta velocidade, resultado da transmissão paralela dos dados. Essa técnica provê maior resistência a condições ruins do meio, como por exemplo atenuação de frequência (FILHO, 2014).

A segunda técnica de modulação é o SC-FDMA, responsável pela transmissão dos dados de *uplink*, ou seja, do dispositivo móvel para a estação base

de transmissão. Os dados são divididos em partes, como é feito no OFDMA, contudo são transmitidos em um mesmo canal e de forma sequencial como mostrado na Figura 5. Isso traz melhorias no espectro de transmissão, contribuindo para redução no consumo de energia do aparelho móvel do usuário (PEREIRA, 2013).

A alocação dos recursos de *downlink* e *uplink* da rede é um problema a ser estudado, visto que deve-se buscar a otimização na alocação dos mesmos. Questões relacionadas ao meio físico, por exemplo, distância do usuário à estação base, velocidade de transmissão, interferências eletromagnéticas, além de detalhes da aplicação que será disponibilizada, como os tipos de dados a serem transmitidos (multimídia, voz), *critérios de Quality of Service (QoS)*, são fatores que devem ser levados em consideração no processo de seleção dos usuários. Esse trabalho de alocação pode ser realizado de diferentes maneiras variando conforme a política de distribuição de cada escalonador. Neste trabalho serão avaliados a alocação de recursos para *downlink*, ou seja, no sentido de recebimento dos dados pelo o usuário, por ser o sentido de tráfego mais consumido nas redes.

Figura 5 - Modulação SC-FDMA



Fonte: Adaptado de Anritsu (2009)

2.2.1 Arquitetura da Rede LTE

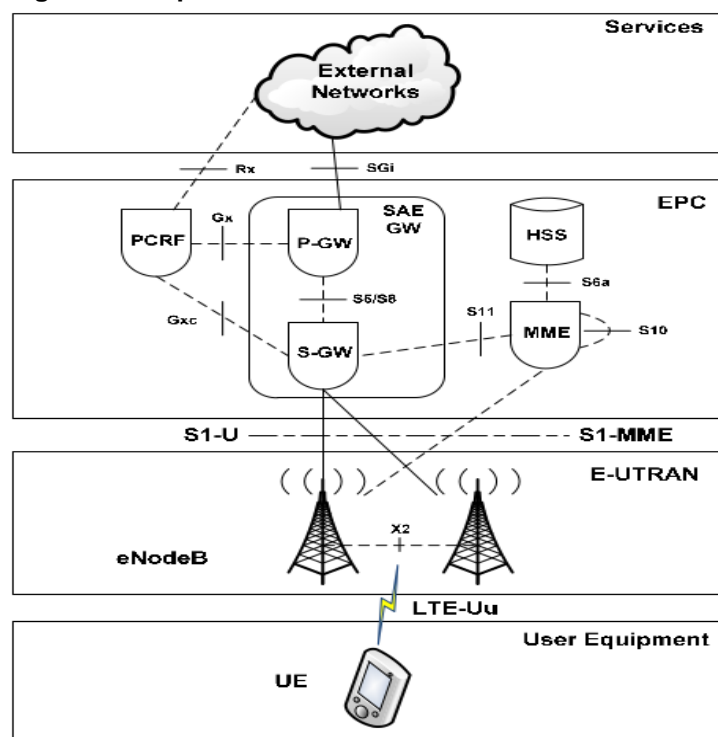
A arquitetura da rede LTE é ilustrada na Figura 6. É dividida basicamente em quatro camadas, sendo elas: Serviço, *Evolved Packet Core (EPC)*, *Evolved*

Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) e User Equipment (UE) (FILHO, 2014).

A camada de serviço é responsável por prover os recursos disponíveis da rede, possibilitando ao usuário conectar-se com a Internet, por exemplo. A camada de EPC representa o núcleo principal da rede LTE e se encarrega de controlar a mobilidade da rede, acesso à serviços e Internet, além de estabelecer uma interface de comunicação entre as redes de acesso e a camada de serviço (FILHO, 2014).

Entretanto as funcionalidades desempenhadas pelo EPC são realizadas pelas seguintes entidades: *Serving Gateway (S-GW)*, *Packet Data Network - GateWay (P-GW)*, *Mobility Management Entity (MME)*, *Home Subscriber Server (HSS)* e o *Policy and Charging Rules Function (PCRF)*.

Figura 6 - Arquitetura da rede LTE



Fonte: Matos et al. (2012)

O S-GW é responsável pelo roteamento de pacotes entre a rede LTE e as tecnologias anteriores, por exemplo o 3G. O P-GW é o roteador de borda do LTE, dentre suas responsabilidades está a alocação de endereços IPs para os usuários. O MME é responsável pelo controle da camada EPC, encarregando-se dos serviços de autenticação, segurança, autorização de acesso à recursos, gerenciamento de

mobilidade, dentre outras atribuições. O HSS mantém os registros e perfis de serviços utilizados pelos usuários da rede. A última entidade do EPC é a PCRF, responsável pela política de controle e carga, além de se preocupar em termos de (QoS) da rede (FILHO, 2014).

O E-UTRAN compõe as estações rádio base de transmissão chamadas de *Enhanced NodeB* (eNodeB), responsável pelo processamento e transmissão do sinal de rádio para os UEs. Os escalonadores de pacotes são implementados e executados no eNodeB, ficando sob responsabilidade deste elemento da rede realizar a alocação dos recursos para os usuários conforme a política de distribuição do algoritmo escalonador utilizado (MANNANI, 2012).

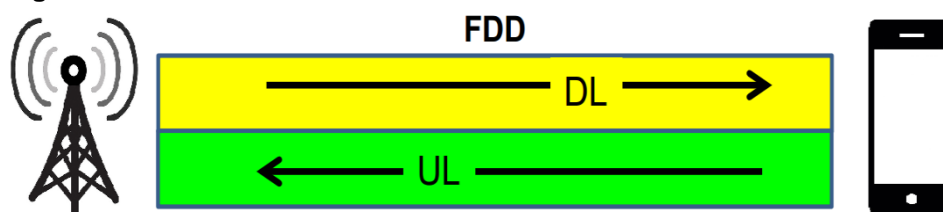
Por último, mas não menos importante está a camada de UE, no qual estão inseridos os equipamentos (*smatphones*, *tablets*) utilizados pelos usuários para transmitir e receber dados na rede.

2.2.2 Estrutura do *Frame* LTE

O LTE implementa a comutação por pacotes para realizar o envio dos dados, os pacotes que serão trafegados na rede, mais precisamente entre o eNodeB e o aparelho móvel do usuário e vice-versa, são chamados de *frame*. Existem dois esquemas *duplex* (envio e recebimento de dados) que o LTE utiliza para transmissão dos dados, sendo eles o *Frequency Division Duplex* (FDD) e *Time Division Duplex* (TDD) (NETKROM, 2016).

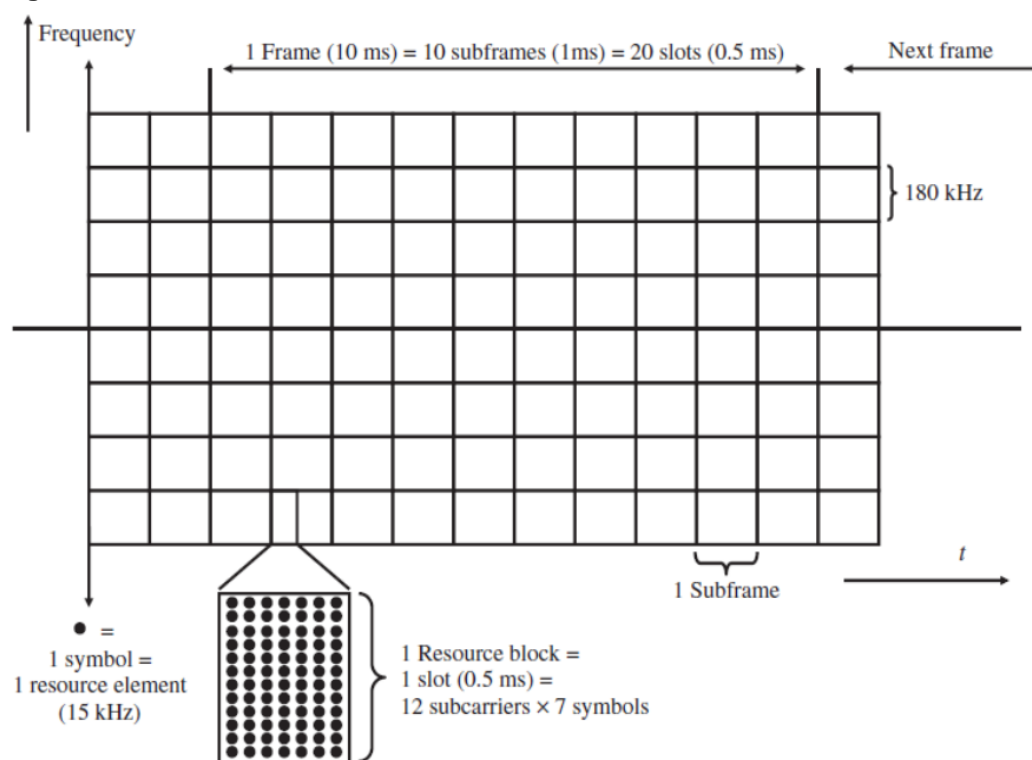
O FDD divide a frequência do espectro utilizando dois canais distintos para transmissão, como mostrados na Figura 7, o primeiro para recebimento (*downlink*) e o outro para envio (*uplink*) dos dados. A transmissão dos dados ocorre simultaneamente, isso é possível através do emparelhamento das frequências, os dois canais possuem largura de banda iguais e fixa (NETKROM, 2016).

Figura 7 - Modo de transmissão do FDD



Fonte: Autoria Própria

A estrutura do *frame* FDD é representada na Figura 8, o período para a transmissão de um frame é de 10 milissegundos (ms), esse mesmo *frame* de radio é fragmentado em 10 *subframes* de 1 ms. Cada *subframe* possui dois *slots* para transmissão, atribuindo a cada *slot* 0.5 ms. Um *slot* normalmente contém 7 símbolos OFDM.

Figura 8 - Estrutura do *frame* FDD

Fonte: Mannani (2012)

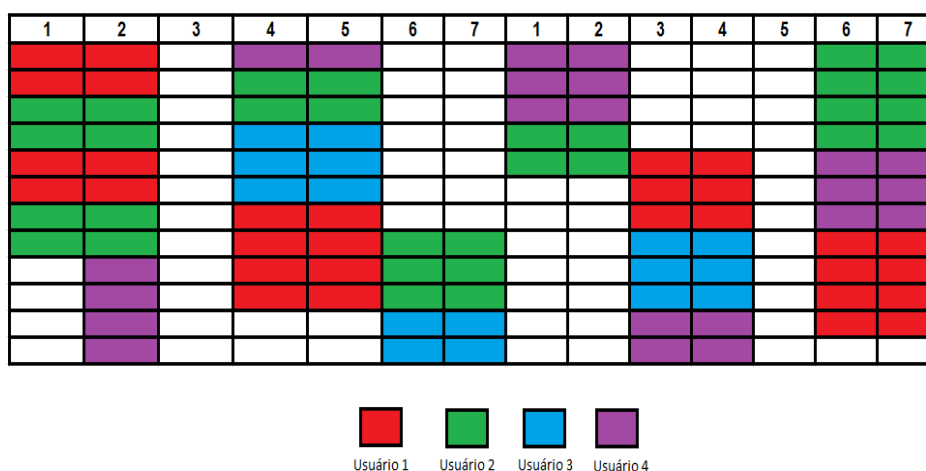
A menor estrutura de modulação é chamada de *Resource Element* (RE), que possui um símbolo OFDM por uma subportadora de frequência. Os RE são agrupados em blocos, chamados *Resource block* (RB), na maioria das vezes o RB

possui dimensões de 7 símbolos por 12 suportadoras. A quantidade de símbolos utilizados pelo RB depende *Cyclic Prefix* (CP) empregado. O CP normal possui 7 símbolos enquanto o CP estendido, que é utilizado em atraso de dados multimídia, possui 6 símbolos (MANNANI, 2012). O FDD é mais utilizado em aplicações simétricas, ou seja, com taxas de transmissão similares entre os dois canais, exemplo o tráfego de voz. (NETKROM, 2016).

A Figura 9 traz um esquema de como são alocados os recursos da rede LTE para os usuários utilizando o tráfego de *download*, ou seja, no sentido do eNodeB para o UE, utilizando a modulação OFDMA.

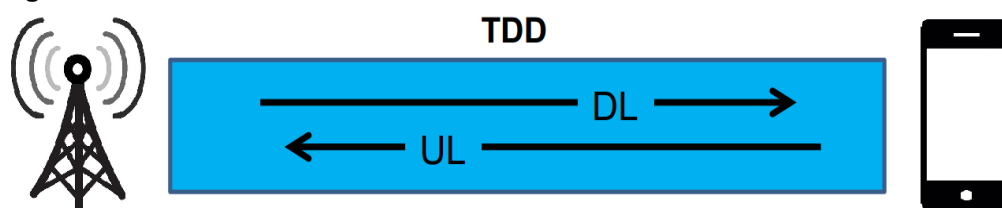
A segunda estrutura de *frame* é o TDD, esta técnica implementa a comunicação *full duplex* sob um canal *half-duplex*, utilizando um mesmo canal para tráfego de *downlink* e *uplink*, como mostrado na Figura 10. O sentido da transmissão é realizado em intervalos de tempo distintos, ou seja, são reservados períodos de tempo para trafegar cada sentido de transmissão dos dados entre o eNodeB e o dispositivo do usuário, a troca de sentido ocorre rapidamente sem o usuário perceber. A banda de transmissão pode ser alterada dinamicamente para os dois modos de transmissão. O TDD também suporta a comunicação simétrica, contudo, é mais utilizado para comunicação assimétrica, contendo um fluxo de dados desbalanceados, característico da Internet, em que o usuário envia uma pequena mensagem via *upstream* e recebe uma carga expressivamente maior de dados por *downstream*.

Figura 9 - Estrutura da alocação dos recursos para *downlink*



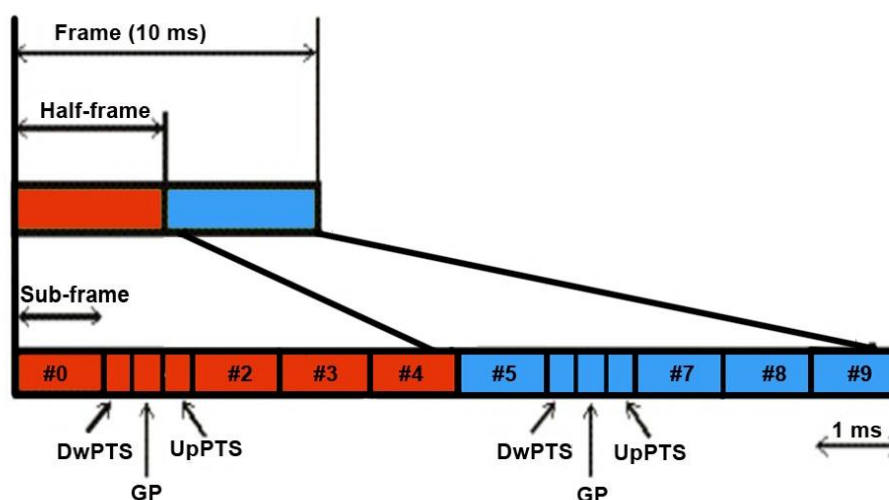
Fonte: Autoria Própria

Figura 10 – Modo de transmissão do TDD



Fonte: Autoria Própria

O *frame* TDD é ilustrado na Figura 11, também possui tempo de transmissão de 10 ms, contudo é dividido em duas partes chamadas *half-frame*, cada parte com 5 ms. Cada *half-frame* é fragmentado em 5 *subframes* de 1 ms. Cada *half-frame* possui 1 *subframe* que é considerado especial, destinados ao tráfego de *downlink* e *uplink*, este *subframe* possui três campos: *Downlink Pilot Timeslot* (DwPTS), *Guard Period* (GP), e *Uplink Pilot Timeslot* (UpPTS), os demais *subframes* são compostos por dois *slots* com duração de 0,5 ms, como na estrutura do *frame* do FDD.

Figura 11 - Estrutura do *frame* TDD

Fonte: Autoria Própria

Neste trabalho, o cenário de simulação será construído utilizando a estrutura de *frame* TDD, visto que esse modo é o mais utilizado na Internet, por trabalhar com cargas de dados desbalanceadas. O sentido de alocação dos recursos será de *downlink*, ou seja, do *enodeB* para o UE. A implementação utilizando o FDD e o sentido *uplink* pode ser considerada em trabalhos futuros.

2.2.3 Algoritmos de Escalonamento

O provimento dos serviços de uma rede celular é realizado a partir da estação base, ou seja, o eNodeB, que seleciona os terminais dos usuários para transmitir em um determinado instante de tempo dentro da área de cobertura da prestadora do serviço. Quanto melhor for o sinal que o aparelho móvel receber da torre de transmissão melhor será sua velocidade de conexão (FILHO, 2014).

O processo de seleção de qual usuário pode transmitir é realizado por algoritmo escalonador de pacote, que é implementado no aparelho de transmissão da estação base (MATOS *et al.*, 2012). A partir da seleção dos usuários pelo algoritmo é que serão alocados os recursos da rede, mais precisamente será atribuído um RB, contido no slot do *frame* para transmissão em um determinado período de tempo.

A 3GPP não definiu qual o algoritmo escalonador deve ser utilizado, ficando a cargo da prestadora escolher o qual lhe convém utilizar. Dentre alguns dos escalonadores existente para a tecnologia LTE estão o *Round-Robin* (RR), *Proportional Fair* (PF) e *Modified Largest Weight Delay First* (MLWDF), cada um com uma política diferenciada para a distribuição dos recursos.

2.2.3.1 *Round-Robin*

O RR compartilha os recursos da rede definindo um intervalo de tempo para cada processo, o tempo de transmissão é igual todos os usuários do sistema. Esse algoritmo consome poucos recursos do eNodeB para selecionar os usuários, pois possui uma política simples de escolha, contudo este escalonador não avalia a qualidade do enlace e nem a latência requisitada pelo usuário, os parâmetros de QoS também não são considerados (SWETHA; MOHANKUMAR; DEVARAJU, 2013).

Assumindo que a rede possui cinco usuários, sendo eles U1, U2, U3, U4, U5, a ordem de distribuição dos recursos é apresentada na Figura 12.

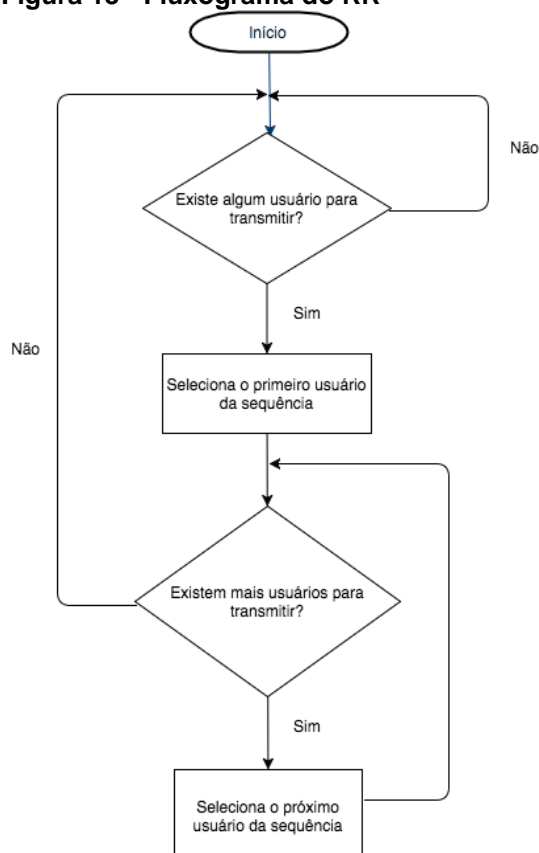
Figura 12 – Alocação dos recursos para os usuários pelo RR



Fonte: Autoria Própria

O fluxograma da Figura 13 mostra como é realizada a alocação dos recursos da rede pelo RR.

Figura 13 - Fluxograma do RR



Fonte: Autoria Própria

2.2.3.2 Proportional Fair

O PF é um escalonador que provê uma boa troca de dados ao longo do sistema, distribuindo os recursos de forma justa entre os usuários. O processo de seleção deste escalonador é realizado a partir do cálculo da taxa de transmissão instantânea do usuário em relação a sua taxa de média de dados. Contudo, esse processo de alocação de usuários é mais custoso para o eNodeB, pois é necessário

informar as posições dos UEs nos *slots* do *frame*. O estado do enlace é avaliado conforme a seguinte equação 2.1 (ANDREWS et al., 2000).

$$W_{(i)} = \frac{r_i(t)}{R_i(t)} \quad (2.1)$$

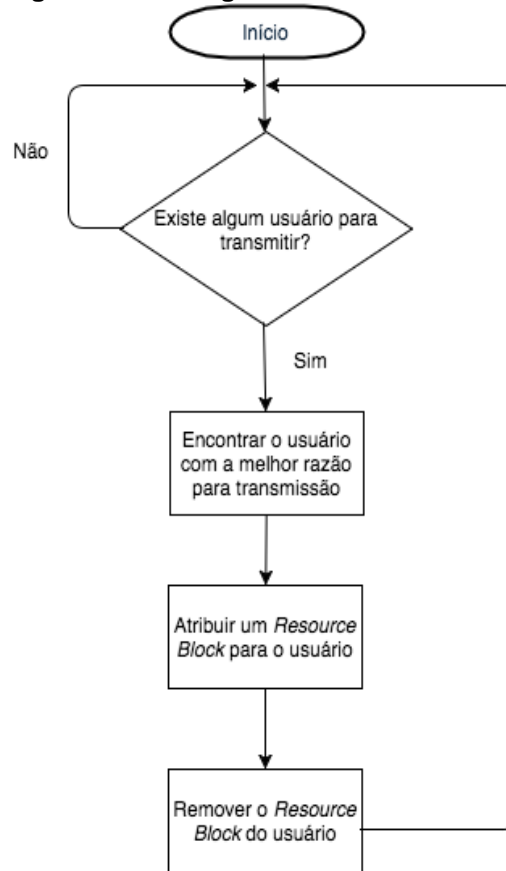
Em que $r_i(t)$ representa a taxa de dados instantânea do canal do usuário e $R_i(t)$ é a taxa média de dados do usuário i .

O cálculo de $R_i(t)$, ou seja, da taxa média de dados é realizado pelo equação 2.2.

$$R_i(t+1) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) R_i(t) + \left(\frac{1}{t_c}\right) r_i(t) & i = i' \\ \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) R_i(t) & i \neq i' \end{cases} \quad (2.2)$$

O termo i' refere-se ao usuário selecionado e t_c ao parâmetro de controle do escalonador. O fluxograma da Figura 14 mostra como é realizada a alocação dos recursos da rede pelo PF.

Figura 14 - Fluxograma do PF



Fonte: Autoria Própria

2.2.3.3 Modified Largest Weighted Delay First

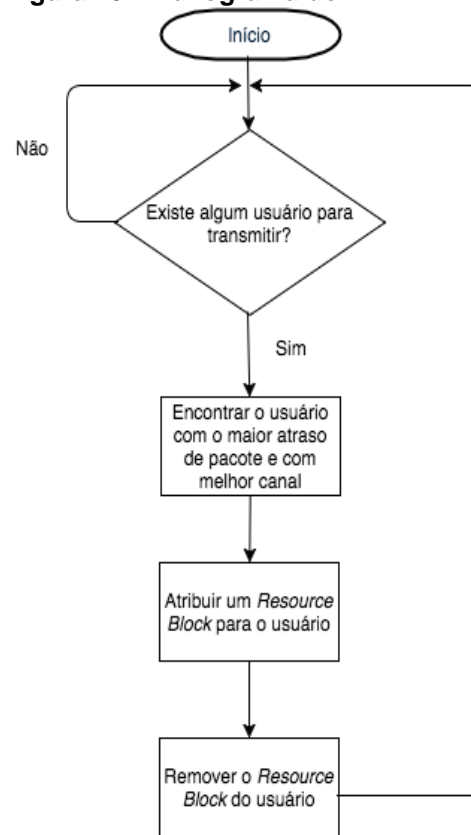
O MLWDF possibilita múltiplos fluxos de dados e usuários com diferentes valores de QoS. Sua política de transmissão prioriza o fluxo com maior atraso de pacote e leva em consideração a qualidade do canal entre os usuários no processo de seleção, as equações 2.3 e 2.4 mostram a forma como o MLWDF seleciona os usuários para a alocação dos recursos da rede (MATOS *et al.*, 2012).

$$w_{(i)} = \alpha_i D_t \frac{r_{(i)}}{R_{(i)}} \quad (2.3)$$

$$\alpha_i = - \frac{\log \delta_{(i)}}{\tau_{(i)}} \quad (2.4)$$

Em que D_t representa o primeiro pacote a atingir o limite de atraso na transmissão, $\delta_{(i)}$ refere-se a probabilidade máxima de atraso e $\tau_{(i)}$ representa o limite do atraso. O fluxograma da Figura 15 mostra o processo de alocação dos recursos pelo MLWDF.

Figura 15 - Fluxograma do MLWDF



Fonte: Autoria Própria

3 DESENVOLVIMENTO

Para analisar o desempenho dos algoritmos escalonadores de pacotes estudados neste trabalho, foi necessário o desenvolvimento de um simulador computacional, no qual foram implementados os três escalonadores e modelado um cenário de rede para a realização das simulações. O simulador foi desenvolvido na linguagem de programação Java, essa é uma linguagem interpretada, orientada a objetos e multiplataformas (HALL, 2010).

Como o Java é orientada a objetos, o desenvolvimento do simulador seguiu este mesmo paradigma de programação. Em que o sistema é modelado através de um conjunto de classe que possuem atributos e métodos, no qual representam uma abstração do mundo real, e a partir dessas classes são instanciados objetos a interagirão entre si, através da troca de mensagens para alcançar um objetivo (BEZERRA, 2015). Foi utilizada a IDE (*Integrated development Environment*) Netbeans, da Oracle, para o desenvolvimento do simulador (ORACLE, 2017).

O primeiro passo para o desenvolvimento do simulador foi a modelagem do cenário de rede, no qual foram criados os usuários, nomeados de $U_1 \dots U_n$, com suas respectivas taxas de transmissão instantâneas com duração de 1 ms. Logo em seguida, foram gerados os primeiros pacotes de dados para serem transmitidos com tempo de geração também de 1 ms. Todos os usuários iniciam a simulação com 25 pacotes e no decorrer recebem um novo conjunto de pacotes a cada 25 ms. A distribuição dos pacotes é igualitária para todos os usuários, como cada pacote leva 1 ms para ser gerado, então, cada usuário receberá 25 pacotes em determinado instante de tempo. A Tabela 1 mostra os dados utilizados para a criação do cenário de rede no qual os algoritmos escalonadores serão empregados.

Tabela 1 - Dados utilizados na realização da simulação

Configuração da Simulação	
Total de usuários	10
Taxa do canal	8 - 230 bps
Tamanho do pacote	8 - 230 bits
Tempo para geração de pacotes	25 ms
Tempo de simulação	200 ms

Fonte: Autoria Própria

As taxas de transmissão para cada usuário foram definidas em bps e esses valores são gerados aleatoriamente, respeitando o intervalo de 8 a 230 bps. Os pacotes a serem transmitidos possuem tamanhos definidos em bits e são gerados aleatoriamente, respeitando o intervalo de 80 a 230 bits. Os dados iniciais gerados para todos os usuários serão os mesmos para as três simulações. O tempo de simulação para análise de cada escalonador é de 200 ms, assim, como cada usuário é selecionado em 1 ms, então serão escolhidos 200 usuários para transmitir.

Para modelar o cenário mais próximo possível de um ambiente real de rede, um dos usuários (U1) recebeu suas taxas de transmissão entre um intervalo inferior aos demais, os valores da taxa de transmissão para esse usuário foram gerados entre 8 a 150 bps. Assim, consideramos que o U1 seja o usuário mais distante da torre de transmissão, contudo, isso não pode ser sempre garantido, pois os valores são gerados aleatoriamente.

Com isso, temos o cenário base para as simulações, entretanto o PF e o MLWDF levam em consideração outros valores em seu processo de seleção. Um conjunto de valores comum a esses dois algoritmos é a taxa média de transmissão $R_{(i)}$, contudo, como no instante zero da simulação nenhum dos usuários transmitiu pacote, então foram gerados os valores iniciais aleatoriamente respeitando o intervalo de 8 a 80 bps. O intervalo utilizado é menor, pois quanto maior for o valor médio de transmissão obtido pelo usuário e se o mesmo tiver uma taxa de transmissão baixa, terá dificuldades para transmitir. A Tabela 2 mostra as taxas médias iniciais geradas para os dois algoritmos.

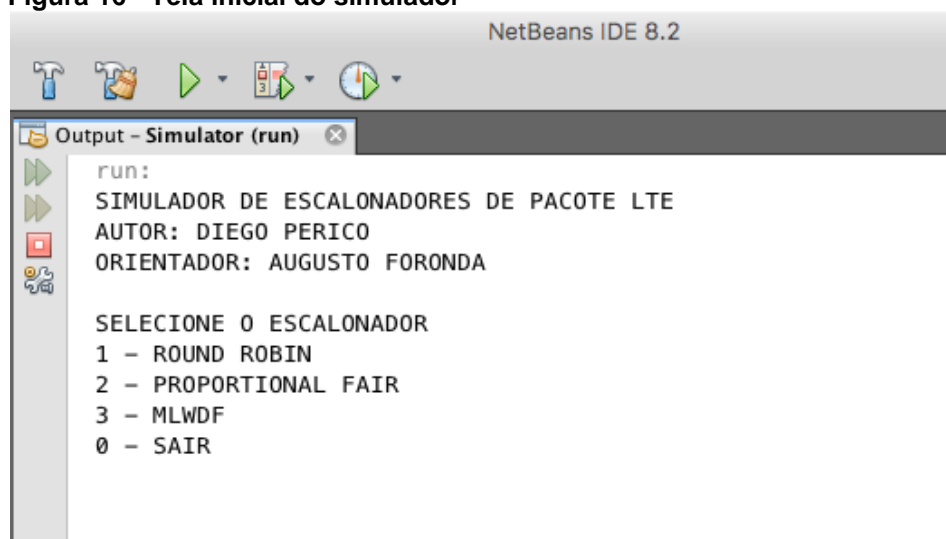
Com o ambiente de simulação criado, o próximo passo é escolher o algoritmo escalador de pacote que será utilizado na simulação. A Figura 16 mostra a tela inicial do simulador.

Tabela 2 - Taxas de transmissão média inicial

Taxa Média Inicial	
U1	54.55
U2	76.50
U3	69.75
U4	40.99
U5	32.19
U6	22.68
U7	32.98
U8	52.45
U9	76.17
U10	9.14

Fonte: Autoria Própria

Figura 16 - Tela inicial do simulador



Fonte: Autoria Própria

A seleção de um usuário é realizada a cada 1 ms, seguindo a política de escolha de cada escalonador. O simulador considera a transmissão parcial dos pacotes, ou seja, caso o usuário selecionado possua uma taxa de transmissão instantânea inferior ao tamanho do pacote, será transmitido apenas o valor suportado pelo canal atual do usuário e o restante continuará na simulação para ser transmitido em uma outra iteração do algoritmo.

Entretanto, o cálculo de delay e *throughput* são apenas realizados quando o pacote for completamente transmitido. O cálculo do *delay*, ou seja, o atraso que o pacote levou para ser transmitido, é realizado pela fórmula 3.1.

$$D_{i,j} = ts_{i,j} - tg_{i,j} \quad (3.1)$$

Em que $D_{i,j}$ representa o valor do *delay* do pacote j , pertencente ao usuário i , $ts_{i,j}$ refere-se ao tempo de simulação em que o pacote foi transmitido por completo e $tg_{i,j}$ é o instante em que o pacote foi gerado.

Para a obtenção do *throughput*, ou seja, a taxa de transferência do pacote, é utilizada a fórmula 3.2.

$$T_{i,j} = \frac{tp_{i,j}}{D_{i,j}} \quad (3.2)$$

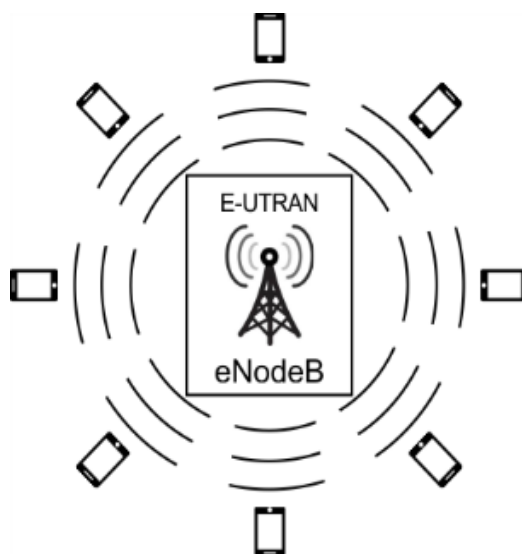
No qual $T_{i,j}$ representa o *throughput* do pacote j pertencente ao usuário i , $tp_{i,j}$ refere-se ao tamanho do pacote transmitido e $D_{i,j}$ representa o atual *delay* do pacote, obtido pela fórmula 3.1.

3.1 SIMULADOR

O simulador desenvolvido possibilita a seleção de usuários e a alocação de *frames* TDD em um ambiente de rede móvel LTE. Foi modelado para simular o funcionamento de três escalonadores de pacotes, no qual a finalidade dessa aplicação é a extração dos valores de *delay* e *throughput* dos usuários submetidos as simulações, utilizando os escalonadores implementados. Com esses valores é possível realizar uma análise de desempenho de cada algoritmo. A topologia do ambiente de rede no qual o simulador foi modelado é mostrada na Figura 17.

Os usuários conectados na rede serão selecionados pelo escalonador de pacotes implementado no eNodeB, ou seja, na torre de transmissão, para transmitir. Como cada escalonador possui uma política de seleção distinta, as implementações dos algoritmos são descritas nas próximas subseções.

Figura 17 - Topologia da rede LTE no simulador



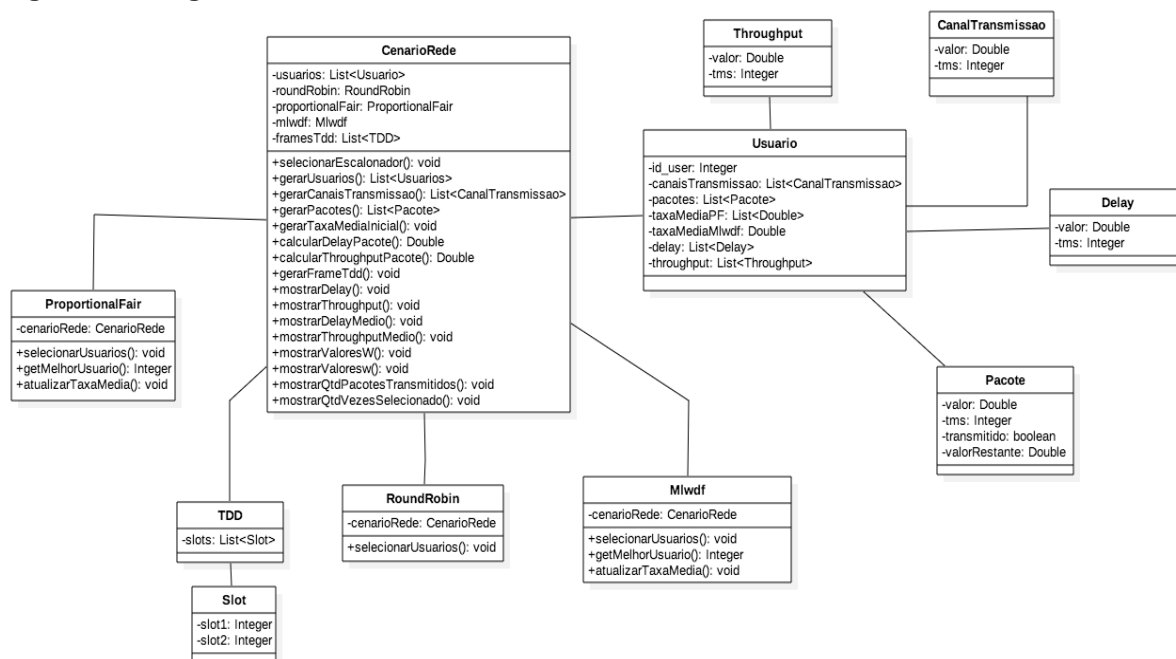
Fonte: Autoria Própria

3.1.1 DIAGRAMA DE CLASSES DO SIMULADOR

Como o simulador foi desenvolvido utilizando o paradigma de programação orientado a objetos, a modelagem desse *software* foi realizada a partir do diagrama de classes, que mostra a estrutura e o funcionamento em alto nível do simulador. A Figura 18 traz o diagrama de classes do simulador.

A classe *CenarioRede* é a principal, no qual está centralizada a criação do ambiente de simulação de rede LTE, também é responsável pelo cálculo do *delay* e *throughput* dos pacotes dos usuários, e na geração dos *frames* TDD's. A classe *Usuario* é a base do simulador, em que contém as características dos usuários, como taxa de transmissão e os pacotes a serem transmitidos, essa classe é comum aos três algoritmos. As classes *RoundRobin*, *ProportionalFair* e *Mlwdf* abstraem os escalonadores.

Figura 18 - Diagrama de classes do simulador



Fonte: Autoria Própria

3.1.2 Implementação do RR

A seleção dos usuários pelo RR é realizada de maneira sequencial e a qualidade do canal de transmissão não é levada em consideração. O RR faz um rodízio dos recursos de rede, ou seja, a cada instante de tempo um usuário i da sequência é selecionado para transmitir, e todos os usuários possuem a mesma preferência de seleção.

Na implementação do RR foi utilizada a estrutura de dados fila, pois possui uma dinâmica de seleção similar ao comportamento do algoritmo na distribuição dos recursos. O primeiro usuário i da fila é extraído, ou seja, selecionado, então é verificado qual é o próximo pacote j de i que será transmitido. No processo de transmissão é verificado se o tamanho de j é inferior a taxa de transmissão instantânea do canal de i . Se isso for verdade, o pacote foi transmitido por completo, caso contrário é transmitido apenas a parte do pacote suportada pelo canal, e por fim, o restante do pacote é adicionado no final da fila para aguardar uma nova transmissão em outras iterações do algoritmo.

3.1.3 Implementação do PF

O PF, ao contrário do RR, leva em consideração a qualidade do canal de transmissão para escolha dos usuários. É selecionado o usuário que possuir a maior razão entre a taxa de transmissão instantânea pela taxa média transmitida, obtidos pela equação 2.1. Assim, para encontrar o melhor usuário da iteração do algoritmo foi necessário adicionar mais um conjunto de dados, a taxa média de transmissão. Como no instante zero da simulação nenhuma transmissão foi realizada, ou seja, nenhum dos usuários possui um valor médio transmitido, então, cada usuário recebe uma taxa inicial gerada aleatoriamente.

Assim, a cada iteração do algoritmo, será calculada esta razão para todos os usuários e o que possuir o maior valor será escolhido para transmitir. Este processo de seleção possibilita uma distribuição justa dos recursos, visto que todos os usuários são analisados para seleção. Ao término de cada iteração do algoritmo, os valores médios de transmissão serão atualizados seguindo a equação 2.2, mostrada no capítulo anterior.

Os parâmetros utilizados na equação 2.2 diferenciam-se dos usuários selecionados e não selecionados. Caso o usuário seja selecionado, o valor do canal de transmissão será multiplicado por 0,2 e em seguida somado com o valor de transmissão médio multiplicado por 0,8. Para os usuários que não foram selecionados na atual iteração, é apenas levado em consideração a sua média de transmissão, no qual será multiplicada por 0,8.

Os valores utilizados na equação de atualização das taxas médias do PF são fixos e iguais para todos os usuários e foram definidos da seguinte maneira: 0,8 representa $(1 - \frac{1}{t_c})$ e 0,2 refere-se a $(\frac{1}{t_c})$.

Este cálculo realizado pelo PF possibilita que a razão dos usuários que não foram selecionados aumente e a dos que transmitiram várias vezes diminua, no decorrer da simulação. Esta política de seleção adotada pelo PF contribui para que todos os usuários possam ser selecionados em algum momento da simulação.

3.1.4 Implementação MLWDF

O último algoritmo implementado foi o MLWDF, sua política de seleção é similar ao PF, pois também avalia a qualidade do canal de transmissão dos usuários. Entretanto, o *delay* instantâneo do pacote possui peso no cálculo da seleção. Isso contribui na escolha dos usuários que possuem maior atraso de pacote, contudo, a qualidade do canal é importante.

Como os usuários que possuem maior atraso de transmissão são os que provavelmente tem as menores taxas, então, se o algoritmo não levar em consideração a qualidade do canal terá um comportamento tendencioso a sempre selecionar os piores usuários da iteração.

Na seleção do MLWDF são considerados três valores: a razão entre a taxa instantânea pela taxa média de transmissão $\left(\frac{r_{(i)}}{R_{(i)}}\right)$, o *delay* atual do pacote (D_t) e um valor de alfa (α_i). Esse último, tem a função de priorizar algum usuário, por exemplo, caso possua um plano especial de dados, contribuindo para que tenha maior preferência na seleção. Nesse cenário de simulação foi considerado que todos os usuários possuem a mesma preferência, assim foi atribuído o mesmo valor de alfa.

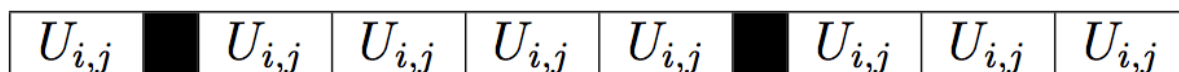
Como no PF, foi necessário gerar os valores médios de transmissão iniciais para cada usuário, esse processo foi realizado aleatoriamente e respeitando o intervalo de 8 a 80 bps. A seleção dos usuários é realizada por meio do cálculo da equação 2.3, o usuário que possuir o maior valor será selecionado para transmitir. A atualização de $R_{(i)}$ a cada iteração se diferencia do PF, em que é realizada apenas uma média aritmética simples entre a média de transmissão atual $R_{(i)}$ somado com a taxa instantânea do canal $r_{(i)}$, e em seguida esses valores são divididos por dois. Apenas o usuário que foi selecionado na iteração terá sua média de transmissão atualizada.

3.1.5 Geração do *Frame* TDD

O *frame* utilizado para transmissão dos pacotes foi o TDD, a alocação desse *frame* ocorre a cada 10 ms. Cada *frame* possui 10 *subframes*, em que cada *subframe* contém 2 *slots* de 0,5 ms de duração. Os *slots* são utilizados para alocação dos pacotes a serem transmitidos. Embora cada *frame* possua 10 *subframes*, apenas 8 deles estão disponíveis para alocação, os outros dois são utilizados para armazenar informações do tráfego de *downlink* e *uplink*.

Para simplificar a implementação do simulador consideramos que cada subframe possui apenas 1 slot com 1 ms de duração, assim, a cada *frame* alocado serão transmitidos apenas 8 usuários. A Figura 19 representa um *frame* TDD alocado com os pacotes dos usuários.

Figura 19 - Exemplo de *frame* TDD alocado



Fonte: Autoria Própria

O frame TDD é alocado no sentido *downlink*, ou seja, da torre de transmissão para os usuários.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são discutidos os resultados obtidos por cada escalonador. Foram realizadas três simulações considerando o mesmo cenário de rede LTE para todos os algoritmos, no qual, foram extraídos os valores de *delay* e *throughput* dos pacotes de cada usuário.

4.1 SELEÇÃO DOS USUÁRIOS

Nesta subseção são discutidos os processos de seleção dos usuários, seguindo a política seleção de cada escalonador.

4.1.1 RR

Como o processo de seleção do RR utiliza método sequencial, a ordem de seleção dos usuários foi com base na sua própria ordem de geração. Figura 20 mostra a sequência de seleção dos usuários no RR.

Tabela 3 - Ordem de seleção dos usuários no RR

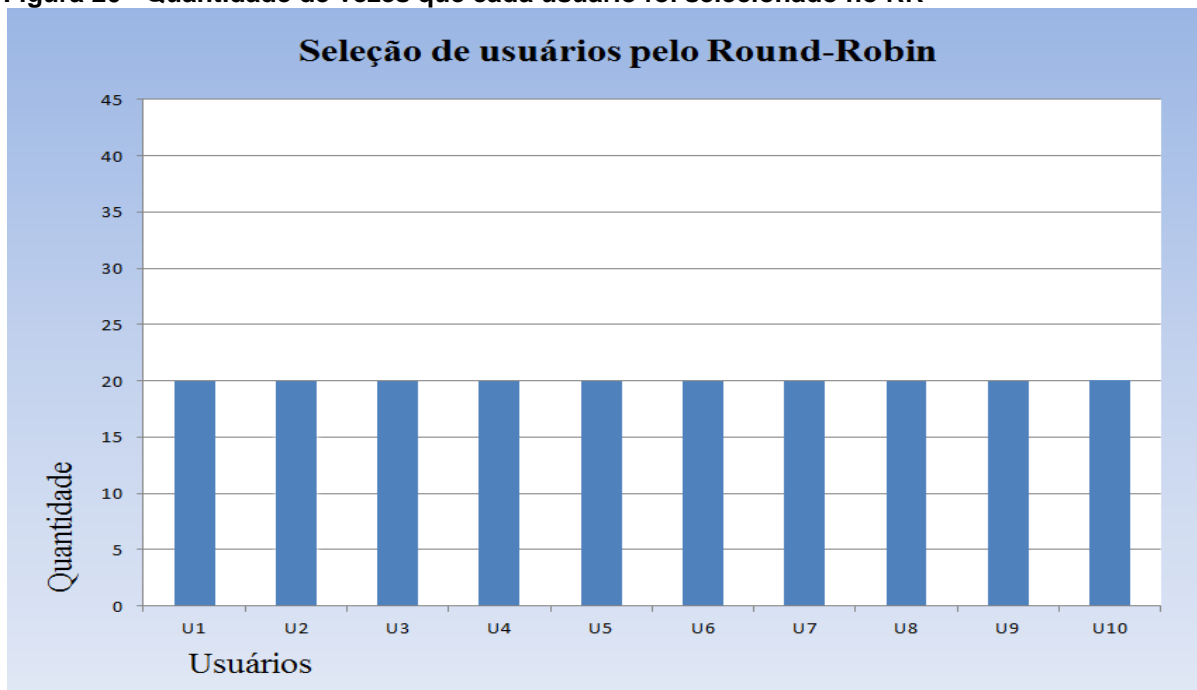
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10

Fonte: Autoria Própria

Como o tempo de simulação foi de 200 ms e 10 usuários foram utilizados no cenário, isso possibilitou que todos os usuários do RR fossem selecionados o

mesmo número de vezes. A Figura 21 mostra a quantidade de vezes que cada usuário foi selecionado.

Figura 20 - Quantidade de vezes que cada usuário foi selecionado no RR

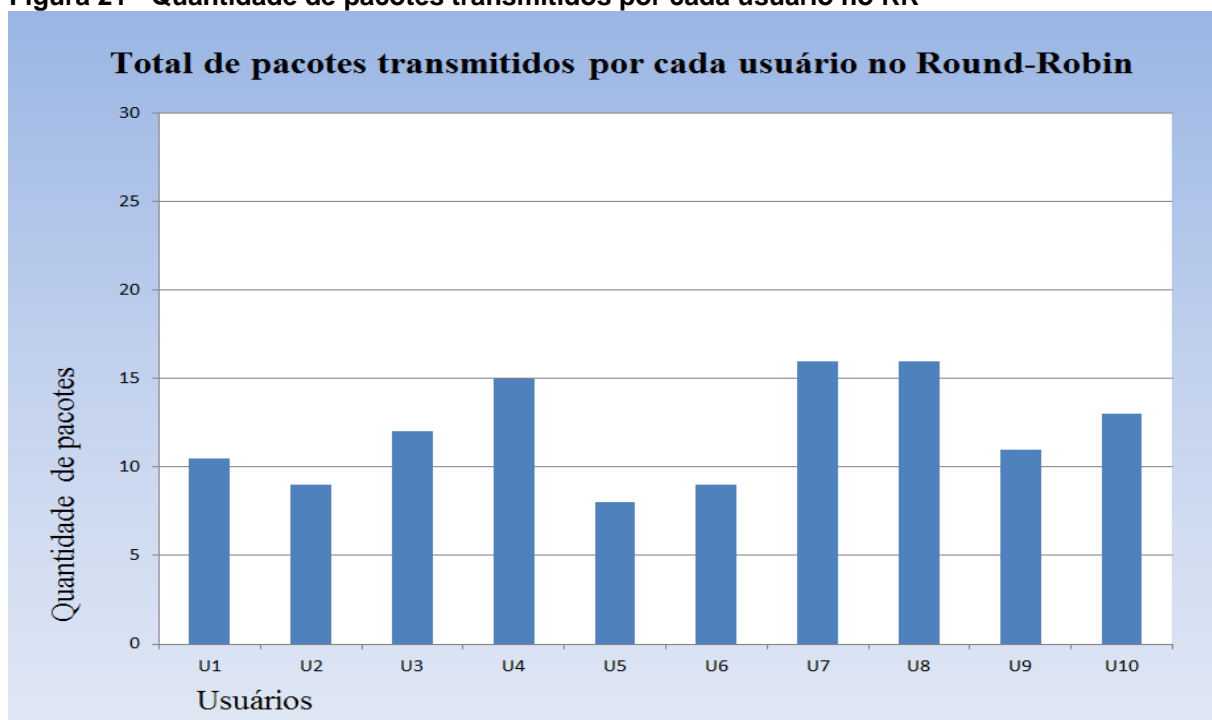


Fonte: Autoria Própria

Como o simulador considera a transmissão parcial dos pacotes, logo, temos que a quantidade de vezes que um usuário foi selecionado pode-se diferenciar do montante de pacotes que o mesmo transmitiu por completo, no decorrer da simulação. Pelo fato dos pacotes serem gerados aleatoriamente, pode ocorrer que um usuário recebe um pacote maior que a taxa instantânea que o mesmo pode transmitir, então, para esse pacote é necessário mais que uma iteração para ser enviado por completo.

A Figura 22 mostra a quantidade de pacotes que cada usuário transmitiu no RR.

Figura 21 - Quantidade de pacotes transmitidos por cada usuário no RR



Fonte: Autoria Própria

A quantidade de pacotes transmitidos pelos usuários no RR foi próxima, visto que os usuários foram selecionados igualmente.

4.1.2 PF

No PF, o processo de seleção é realizado a partir do cálculo de 2.1, no qual será selecionado o usuário que possuir o melhor valor em cada iteração do algoritmo. Os valores de $W_{(i)}$ obtidos por cada usuário no decorrer da simulação são mostrados nas figuras seguintes.

As Tabelas 23, 24 ... 32, trazem os valores de $W_{(i)}$ obtidos pelos usuários U1, U2 ... U10 respectivamente, no processo de seleção do PF.

Tabela 4 - Valores de $W_{(t)}$ obtidos por U1 no processo de seleção do PF

1,71	2,14	2,68	3,34	4,18	2,56	3,19	3,99	4,99	6,24
7,8	9,75	4,23	5,29	6,61	8,26	10,33	12,91	16,14	20,17
4,17	5,22	6,52	8,15	10,19	12,73	15,92	19,9	24,87	31,09
3,92	4,9	6,12	7,65	9,56	11,95	14,94	18,68	23,35	29,18
4,4	5,5	6,87	8,59	10,74	13,42	16,77	20,97	26,21	32,76
40,95	2,43	3,03	3,79	4,74	5,92	7,41	9,26	11,57	14,46
18,08	22,6	28,25	35,31	44,14	4,58	5,73	7,16	8,95	11,19
13,99	17,49	21,86	27,33	34,16	4,48	5,59	6,99	8,74	10,93
13,66	17,07	21,34	26,68	33,35	3,05	3,82	4,77	5,97	7,46
9,32	11,65	14,57	18,21	22,76	28,45	17,41	21,77	27,21	1,2
1,5	1,87	2,34	2,93	3,66	4,57	5,71	7,14	8,93	11,16
13,95	17,44	21,8	27,25	34,06	4,47	5,59	6,99	8,74	10,92
13,66	17,07	21,34	26,67	4,35	5,43	6,79	8,49	10,61	13,27
16,59	20,73	25,92	32,39	4,45	5,56	6,95	8,69	10,87	13,58
16,98	21,22	26,53	33,16	12,53	15,66	19,58	24,47	30,59	38,24
0,6	0,75	0,94	1,17	1,47	1,83	2,29	2,86	3,58	4,47
5,59	6,99	8,74	10,92	13,66	17,07	35,8	1,6	2	2,5
3,12	3,9	4,88	6,1	7,62	9,53	11,91	14,89	18,61	23,27
29,08	4,4	5,49	6,87	8,58	10,73	13,41	16,77	20,96	26,2
12,77	15,97	19,96	24,95	31,19	4,43	5,54	6,92	8,66	10,82

Fonte: Autoria Própria

Tabela 5 - Valores de $W_{(t)}$ obtidos por U2 no processo de seleção do PF

0,15	0,19	0,23	0,29	0,36	0,45	0,56	0,71	0,88	1,1
1,38	1,72	2,15	2,69	3,37	4,21	5,26	6,57	8,22	10,27
12,84	16,05	20,06	25,08	31,35	4,43	5,54	6,93	8,66	10,83
13,53	16,92	21,14	4,2	5,26	6,57	8,21	10,27	12,83	16,04
20,05	25,06	4,31	5,39	6,74	8,42	10,53	13,16	16,45	20,56
25,7	32,13	44,2	4,59	5,73	7,16	8,96	11,19	13,99	17,49
21,86	27,33	34,16	42,7	8,81	11,01	13,77	17,21	21,51	26,89
33,61	42,01	52,51	0,84	1,05	1,31	1,64	2,05	2,56	3,2
4,01	5,01	6,26	7,82	9,78	12,23	15,28	19,1	23,88	29,85
37,31	4,52	5,64	7,06	8,82	11,02	13,78	17,23	21,53	26,92
33,65	4,47	5,59	6,98	8,73	10,91	13,64	17,05	21,31	26,64
4,75	5,94	7,42	9,28	11,59	14,49	18,12	22,65	28,31	35,38
44,23	4,59	5,73	7,16	8,96	11,19	13,99	17,49	21,86	27,33
34,16	42,7	4,57	5,71	7,14	8,93	11,16	13,95	17,44	21,8
27,25	34,06	42,58	23,24	29,05	36,31	45,39	1,96	2,45	3,07
3,83	4,79	5,99	7,49	9,36	11,7	14,63	18,29	22,86	4,26
5,32	6,65	8,31	10,39	12,99	16,23	20,29	25,36	8,04	10,05
12,56	15,7	19,63	24,53	30,66	38,33	47,91	5,66	7,07	8,84
11,05	13,81	17,27	21,58	26,98	33,72	1,1	1,37	1,71	2,14
2,67	3,34	4,18	5,22	6,53	8,16	10,2	12,76	15,94	19,93

Fonte: Autoria Própria

Tabela 6 - Valores de $W_{(t)}$ obtidos por U3 no processo de seleção do PF

1,37	1,71	2,13	2,67	3,34	4,17	5,21	5,24	6,55	1,76
2,2	2,74	3,43	4,29	5,36	6,7	8,37	10,47	13,09	16,36
20,45	2,79	3,48	4,35	5,44	6,8	8,5	10,62	13,28	16,6
20,75	25,94	4,33	5,41	6,77	8,46	10,58	13,22	16,53	20,66
25,82	2,18	2,72	3,4	4,26	5,32	6,65	8,31	10,39	12,99
16,23	20,29	25,36	31,7	39,63	4,54	5,68	7,1	8,87	11,09
13,86	17,32	21,66	27,07	33,84	42,3	4,57	5,71	7,14	8,92
11,15	13,94	17,43	21,78	27,23	34,03	42,54	4,57	5,71	7,14
8,93	11,16	13,95	17,43	21,79	27,24	15,85	19,82	24,77	30,96
3,74	4,68	5,85	7,31	9,14	11,42	14,28	17,85	22,31	27,89
3,82	4,77	5,97	7,46	9,32	11,65	14,57	18,21	22,76	4,25
5,32	6,64	8,31	10,38	12,98	16,22	20,28	25,35	31,68	39,61
11,25	14,07	17,58	21,98	27,47	34,34	42,92	2,46	3,07	3,84
4,8	6	7,49	9,37	11,71	14,64	18,3	22,87	6,93	8,66
10,83	13,54	16,92	21,15	26,44	33,05	41,31	51,63	64,54	3,57
4,46	5,58	6,97	8,71	10,89	13,61	17,02	21,27	1,45	1,81
2,27	2,83	3,54	4,43	5,54	6,92	8,65	10,81	13,52	16,9
21,12	26,4	33	4,46	5,57	6,97	8,71	10,89	13,61	17,01
21,26	26,58	4,35	5,43	6,79	8,49	10,61	13,26	16,58	20,72
25,9	4,33	5,41	6,77	8,46	10,57	13,22	16,52	20,65	25,82

Fonte: Autoria Própria

Tabela 7 - Valores de $W_{(t)}$ obtidos por U4 no processo de seleção do PF

1,38	1,72	2,16	2,69	3,37	4,21	4,93	6,16	3,03	3,79
4,74	5,92	7,4	9,25	11,56	14,45	18,06	4,97	6,21	7,76
9,7	12,12	15,15	18,94	23,68	29,6	37	4,95	6,19	7,73
9,67	12,08	15,1	18,88	23,6	29,5	4,4	5,5	6,88	8,6
10,75	13,44	16,8	21	26,24	32,8	41,01	4,31	5,39	6,73
8,41	10,52	13,15	16,43	20,54	25,68	32,1	40,12	5,89	7,37
9,21	11,51	14,39	17,98	22,48	28,1	35,12	43,9	4,38	5,47
6,84	8,55	10,68	13,36	16,69	20,87	26,09	32,61	40,76	5,96
7,45	9,32	11,64	14,55	18,19	22,74	28,43	0,35	0,44	0,55
0,69	0,86	1,07	1,34	1,68	2,09	2,62	3,27	4,09	5,11
6,39	7,99	9,99	12,48	15,61	19,51	24,38	12,22	15,28	19,1
23,87	12,23	15,29	19,11	23,89	29,86	37,32	5,81	7,27	9,09
11,36	14,2	17,75	22,18	27,73	34,66	5,39	6,73	8,42	10,52
13,15	16,44	20,55	25,69	32,11	1,3	1,62	2,03	2,53	3,17
3,96	4,95	6,19	7,73	9,67	12,08	15,1	18,88	23,6	29,5
36,87	46,09	57,62	4,68	5,84	7,31	9,13	11,41	14,27	17,84
22,29	4,24	5,3	6,62	8,28	10,35	12,94	16,17	20,21	9,48
11,86	14,82	18,52	23,16	28,94	36,18	45,23	56,53	4,67	5,84
7,3	9,12	11,4	14,25	17,81	22,27	27,83	5,4	6,76	8,44
10,56	13,19	16,49	20,62	25,77	32,21	1,01	1,26	1,58	1,97

Fonte: Autoria Própria

Tabela 8 - Valores de $W_{(t)}$ obtidos por U5 no processo de seleção do PF

0,52	0,65	0,82	1,02	1,27	1,59	1,99	2,49	3,11	3,89
4,86	6,07	7,59	9,49	11,86	14,83	3,94	4,92	6,15	7,69
9,61	12,02	15,02	18,78	23,47	29,34	36,67	45,84	4,6	5,75
7,19	8,98	11,23	14,03	17,54	21,93	27,41	4,36	5,45	6,82
8,52	10,65	13,32	16,64	20,81	26,01	32,51	40,64	4,55	5,69
7,11	8,89	11,11	13,89	17,36	21,71	27,13	33,91	42,39	4,57
5,71	7,14	8,92	11,15	13,94	17,43	21,79	27,23	34,04	42,55
13,79	17,24	21,55	26,93	33,67	42,08	11,3	14,13	17,66	22,08
27,6	4,37	5,46	6,82	8,53	10,66	13,33	16,66	20,82	26,03
32,54	40,67	2,66	3,33	4,16	5,2	6,5	8,13	10,16	12,7
15,87	19,84	24,8	30,99	2,38	2,97	3,72	4,65	5,81	7,26
9,07	11,34	14,18	17,72	22,15	27,69	34,61	43,27	4,58	5,72
7,15	8,94	11,17	13,97	17,46	21,82	27,28	34,1	42,63	4,57
5,71	7,14	8,93	11,16	13,95	17,44	21,8	14,8	18,49	23,12
28,9	36,12	6,77	8,46	10,57	13,22	16,52	20,65	25,82	32,27
40,34	1,8	2,26	2,82	3,52	4,4	5,51	6,88	8,6	10,75
13,44	16,8	21	1,2	1,5	1,88	2,34	2,93	3,66	4,58
5,72	7,15	8,94	11,18	13,97	17,47	21,84	27,29	34,12	4,48
5,59	6,99	8,74	10,93	13,66	17,07	21,34	26,67	33,34	4,46
5,58	6,98	8,72	10,9	13,62	17,03	21,29	26,61	33,26	4,46

Fonte: Autoria Própria

Tabela 9 - Valores de $W_{(t)}$ obtidos por U6 no processo de seleção do PF

0,94	1,17	1,47	1,84	2,29	2,87	3,58	4,48	5,6	7
8,75	3,43	4,29	5,36	6,7	8,38	10,47	13,09	16,36	4,02
5,02	6,28	7,85	9,81	12,26	15,33	19,16	23,95	29,94	4,41
5,51	6,89	8,61	10,77	13,46	16,83	21,03	26,29	32,86	9,79
12,24	15,29	19,12	23,9	29,87	37,34	4,52	5,65	7,06	8,82
11,03	13,78	17,23	21,53	26,92	33,65	42,06	15,11	18,89	23,61
29,51	36,88	46,11	4,22	5,28	6,59	8,24	10,3	12,88	16,1
20,12	25,16	31,44	39,31	5,17	6,46	8,08	10,09	12,62	15,77
19,72	24,65	30,81	5,29	6,61	8,27	10,33	12,92	16,15	20,18
25,23	31,54	39,42	49,28	5,12	6,39	7,99	9,99	12,49	15,61
19,51	24,39	30,49	3,69	4,61	5,77	7,21	9,01	11,26	14,08
17,6	22	27,49	34,37	3,27	4,09	5,11	6,39	7,98	9,98
12,47	15,59	19,49	24,36	30,45	0,49	0,61	0,76	0,95	1,19
1,48	1,85	2,32	2,9	3,62	4,52	5,65	7,07	8,84	11,04
13,81	17,26	21,57	26,96	33,71	42,13	4,57	5,71	7,14	8,92
11,15	13,94	17,42	21,77	27,22	34,02	4,47	5,59	6,99	8,74
10,92	13,65	17,07	21,33	4,21	5,26	6,58	8,22	10,28	12,85
16,06	20,08	25,1	31,37	39,21	4,54	5,67	7,09	8,86	11,08
13,85	17,31	21,63	27,04	4,36	5,44	6,81	8,51	10,63	13,29
16,62	20,77	25,96	4,33	5,42	6,77	8,46	10,58	13,22	16,53

Fonte: Autoria Própria

Tabela 10 - Valores de $W_{(i)}$ obtidos por U7 no processo de seleção do PF

4,41	5,51	2,9	3,62	2,67	3,34	4,17	5,21	6,52	8,15
3,49	4,36	5,45	6,82	8,52	10,65	13,31	16,64	2,1	2,63
3,28	4,1	5,13	6,41	8,01	10,02	12,52	15,65	19,57	24,46
30,57	2,28	2,85	3,57	4,46	5,57	6,97	8,71	10,89	13,61
17,01	21,26	26,58	9,55	11,94	14,93	18,66	23,32	29,15	36,44
6,98	8,73	10,91	13,63	17,04	21,3	26,63	33,29	41,61	52,01
4,64	5,8	7,25	9,07	11,34	14,17	17,71	22,14	27,67	34,59
43,24	6,65	8,32	10,4	13	16,25	20,31	25,39	31,73	39,66
3,38	4,23	5,28	6,61	8,26	10,32	12,9	16,13	20,16	25,2
31,5	39,38	49,22	4,35	5,43	6,79	8,49	10,61	13,26	16,58
20,72	25,9	3,92	4,9	6,13	7,66	9,57	11,97	14,96	18,7
23,37	29,21	5,69	7,11	8,89	11,12	13,89	17,37	21,71	27,14
33,92	42,4	3,57	4,47	5,58	6,98	8,72	10,91	13,63	17,04
21,3	26,62	33,28	2,47	3,09	3,86	4,83	6,03	7,54	9,43
11,79	14,73	18,42	23,02	28,78	35,97	44,96	56,2	4,67	5,83
7,29	9,12	11,4	14,24	17,81	22,26	27,82	1,2	1,49	1,87
2,33	2,92	3,65	4,56	5,7	7,12	8,91	11,13	13,91	17,39
21,74	34,2	1,14	1,42	1,77	2,22	2,77	3,46	4,33	5,41
6,77	8,46	10,57	13,21	16,52	20,65	25,81	32,26	4,45	5,56
6,95	8,69	10,86	13,58	16,97	21,21	26,51	4,34	5,43	6,79

Fonte: Autoria Própria

Tabela 11 - Valores de $W_{(i)}$ obtidos por U8 no processo de seleção do PF

0,79	0,98	1,23	1,53	1,92	2,4	3	3,75	4,68	5,85
7,32	9,15	11,43	3,7	4,63	5,79	7,23	9,04	11,3	14,13
17,66	22,08	21,35	26,69	1,82	2,28	2,85	3,56	4,45	5,56
6,96	8,7	10,87	13,59	16,98	21,23	26,54	33,17	4,46	5,58
6,97	8,71	10,89	13,62	17,02	21,28	26,6	33,24	41,55	3,09
3,87	4,84	6,04	7,55	9,44	11,8	14,76	18,44	23,06	28,82
36,02	45,03	6,15	7,68	9,6	12	15,01	18,76	23,45	29,31
36,64	45,79	4,6	5,75	7,18	8,98	11,23	14,03	17,54	21,93
27,41	34,26	8,92	11,15	13,94	17,42	21,78	27,22	34,03	3,69
4,62	5,77	7,22	9,02	11,28	14,1	17,62	22,02	4,23	5,29
6,61	8,26	10,33	12,91	16,14	20,18	4,24	5,29	6,62	8,27
10,34	12,93	16,16	20,2	25,25	31,56	4,27	5,34	6,68	8,35
10,43	13,04	16,3	20,38	25,47	31,84	39,8	49,75	4,13	5,16
6,45	8,06	10,08	12,6	15,75	19,69	6,88	8,6	10,75	13,44
16,8	21	26,25	32,81	41,02	5,24	6,55	8,19	10,24	12,8
16	19,99	24,99	31,24	39,05	2,95	3,68	4,6	5,75	7,19
8,99	11,24	14,05	17,56	21,95	5,68	7,1	8,88	11,09	13,87
17,33	21,67	27,09	33,86	3,47	4,34	5,43	6,78	8,48	10,6
13,24	16,56	20,69	25,87	32,34	2,19	2,73	3,42	4,27	5,34
6,68	8,35	10,43	13,04	16,3	20,38	25,47	31,84	14,16	17,7

Fonte: Autoria Própria

Tabela 12 - Valores de $W_{(i)}$ obtidos por U9 no processo de seleção do PF

2,14	2,68	3,34	1,53	1,92	2,4	2,99	3,74	4,68	5,85
7,31	9,14	11,42	14,28	3,91	4,88	6,1	7,63	9,54	11,92
14,9	18,62	23,28	2,8	3,5	4,38	5,47	6,84	8,55	10,69
13,36	16,7	20,87	26,09	3,36	4,2	5,25	6,56	8,2	10,25
12,81	16,02	20,02	25,03	31,28	4,43	5,54	6,93	8,66	10,82
13,53	16,91	21,14	26,42	33,03	41,29	4,56	5,7	7,12	8,9
11,13	13,91	17,39	21,74	27,17	33,96	42,45	4,73	5,91	7,39
9,24	11,55	14,44	18,05	22,56	28,2	35,25	44,07	4,58	5,73
7,16	8,95	11,19	13,99	17,49	21,86	27,32	34,15	4,48	5,59
6,99	8,74	10,93	13,66	17,07	21,34	26,68	2,62	3,28	4,1
5,12	6,41	8,01	10,01	12,51	15,64	19,55	24,44	4,3	5,37
6,71	8,39	10,49	13,11	16,39	20,49	25,61	32,01	40,02	4,55
5,68	7,1	8,88	11,1	13,87	17,34	21,68	27,09	33,87	42,33
4,57	5,71	7,14	8,92	11,15	13,94	17,43	21,78	27,23	27,44
34,3	4,19	5,24	6,55	8,19	10,24	12,8	16	20	25
31,25	39,06	48,82	61,03	4,78	5,97	7,47	9,33	11,67	14,59
18,23	22,79	2,63	3,28	4,11	5,13	6,41	8,02	10,02	12,53
15,66	19,57	24,47	30,59	38,23	47,79	6,37	7,96	9,96	12,44
15,56	19,44	24,31	3,26	4,07	5,09	6,36	7,95	9,94	12,43
15,53	19,42	24,27	30,34	4,42	5,52	6,9	8,63	10,79	13,48

Fonte: Autoria Própria

Tabela 13 - Valores de $W_{(i)}$ obtidos por U10 no processo de seleção do PF

20,71	0,87	1,08	1,35	1,69	2,12	2,64	3,31	4,13	5,16
6,46	8,07	10,09	12,61	15,76	3,99	4,98	6,23	7,79	9,74
12,17	15,21	19,02	23,77	29,71	37,14	4,51	5,64	7,05	8,82
11,02	13,78	17,22	21,52	26,9	4,35	5,44	6,8	8,5	10,63
13,28	16,6	20,76	25,95	4,33	5,42	6,77	8,46	10,58	13,22
16,53	20,66	25,82	32,28	15,03	18,79	23,48	29,36	36,69	45,87
57,33	7,91	9,89	12,36	15,46	19,32	24,15	30,19	37,73	1,63
2,04	2,55	3,19	3,99	4,99	6,23	7,79	9,74	12,17	15,22
19,02	23,77	29,72	37,15	3,13	3,92	4,89	6,12	7,65	9,56
11,95	14,94	18,67	23,34	29,17	4,8	5,99	7,49	9,37	11,71
14,64	18,3	22,87	28,59	35,73	6,96	8,7	10,88	13,6	17
21,24	26,56	33,19	4,46	5,58	6,97	8,72	10,89	13,62	17,02
21,28	26,6	33,25	8,61	10,76	13,45	16,82	21,02	26,28	32,85
41,06	4,83	6,03	7,54	9,43	11,79	14,73	18,42	23,02	28,78
4,03	5,04	6,3	7,87	9,84	12,29	15,37	19,21	24,01	30,02
37,52	46,9	5,9	7,37	9,21	11,52	14,39	17,99	22,49	28,11
2,67	3,34	4,18	5,22	6,52	8,15	10,19	12,74	15,93	19,91
4,16	5,2	6,51	8,13	10,16	12,71	15,88	19,85	24,82	31,02
1,99	2,48	3,1	3,88	4,85	6,06	7,58	9,47	11,84	14,8
18,51	23,13	4,26	5,33	6,66	8,33	10,41	13,01	16,26	20,33

Fonte: Autoria Própria

A ordem de seleção dos usuários no PF foi distinta do RR, visto que o PF se preocupa com a qualidade do canal. A Figura 33 mostra a ordem de seleção dos usuários no PF.

A quantidade de vezes que os usuários foram selecionados no PF ficou próximo ao resultado produzido pelo RR, contudo a ordem de seleção dos usuários foi distinta. O resultado foi similar devido ao PF contribuir para seleção de todos os

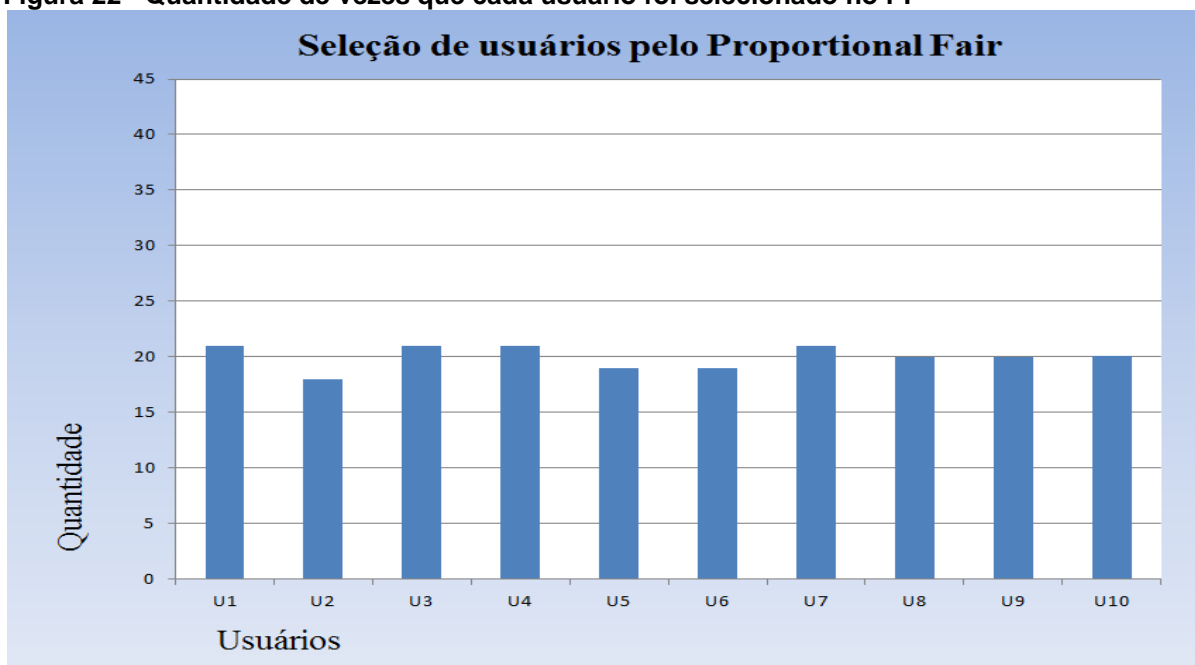
usuários em algum momento da simulação. Esses números tendem a diferenciar-se com o aumento do tempo de simulação, visto que o algoritmo passará por um número maior de iterações. A Figura 34 mostra a quantidade de vezes que cada usuário foi selecionado no PF.

Tabela 14 - Ordem de seleção dos usuários no PF

U10	U7	U9	U7	U1	U4	U3	U4	U3	U7
U6	U1	U8	U9	U10	U5	U4	U7	U6	U1
U3	U8	U9	U8	U2	U10	U4	U5	U6	U1
U7	U3	U2	U9	U10	U4	U5	U8	U6	U1
U3	U2	U7	U10	U9	U6	U4	U5	U8	U7
U1	U2	U2	U10	U3	U9	U6	U4	U5	U7
U10	U8	U6	U2	U1	U3	U9	U4	U10	U5
U7	U8	U2	U6	U1	U5	U3	U9	U4	U7
U5	U8	U6	U10	U1	U3	U4	U9	U8	U3
U2	U5	U7	U6	U10	U1	U9	U8	U1	U3
U2	U7	U6	U5	U10	U8	U4	U9	U3	U2
U4	U7	U10	U6	U1	U8	U4	U5	U9	U3
U2	U7	U10	U1	U6	U4	U3	U8	U5	U9
U10	U2	U7	U1	U4	U8	U5	U3	U9	U10
U9	U5	U2	U1	U8	U6	U2	U7	U3	U1
U5	U10	U4	U9	U8	U6	U7	U3	U2	U10
U4	U9	U5	U6	U8	U1	U1	U2	U4	U10
U7	U7	U3	U8	U6	U9	U2	U4	U5	U10
U1	U3	U9	U6	U8	U2	U4	U7	U5	U1
U3	U10	U6	U9	U1	U4	U7	U8	U5	U3

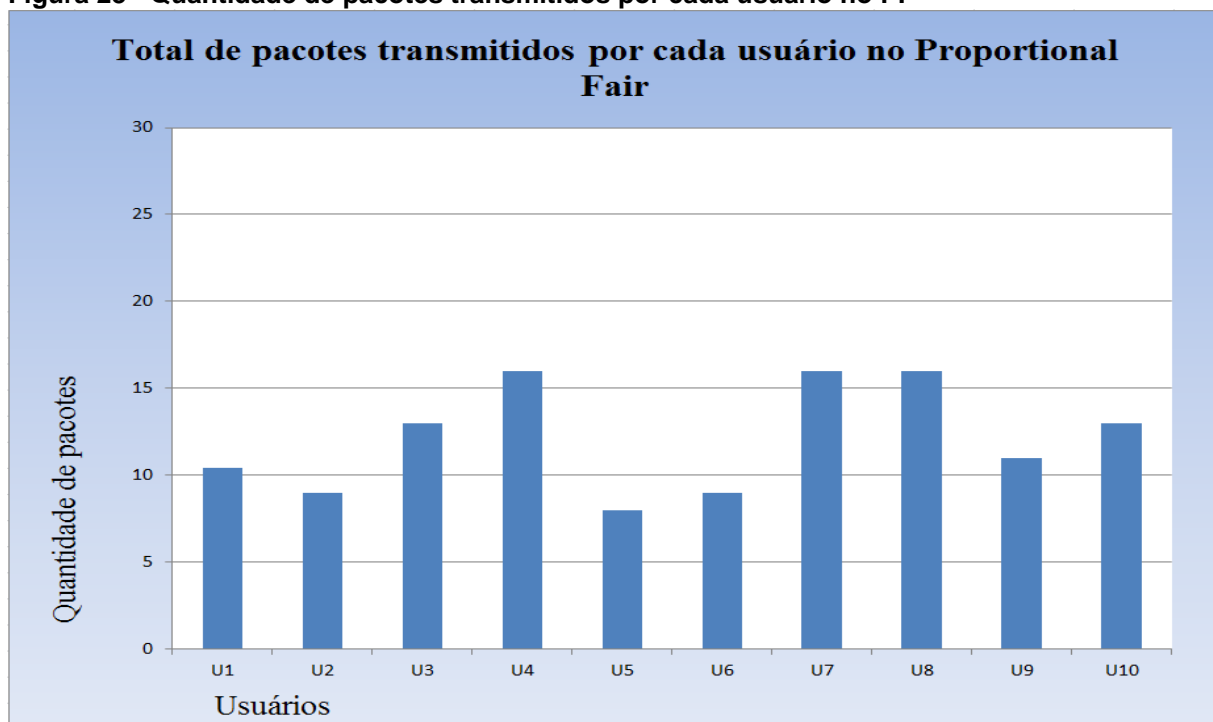
Fonte: Autoria Própria

Figura 22 - Quantidade de vezes que cada usuário foi selecionado no PF



Fonte: Autoria Própria

O número de pacotes transmitidos por cada usuário no PF é mostrado na Figura 35.

Figura 23 - Quantidade de pacotes transmitidos por cada usuário no PF

Fonte: Autoria Própria

A quantidade de pacotes transmitidos pelos usuários no PF foi próxima a do RR, isso ocorreu pela boa distribuição dos recursos realizada pelo PF.

4.1.3 MLWDF

O processo de seleção do MLWDF é realizado a partir do cálculo de 2.3, no qual será selecionado o usuário que possuir o melhor valor em cada iteração do algoritmo. As Tabelas 36, 37 ... 45, trazem os valores de $w_{(i)}$ obtidos pelos usuários U1, U2 ... U10 respectivamente, no processo de seleção do MLWDF.

Tabela 15 - Valores de $w_{(i)}$ obtidos por U1 no processo de seleção do MLWDF

1,71	1,71	3,42	5,14	5,05	6,31	7,58	8,84	10,1	11,36
11,98	13,32	14,65	13,71	14,85	12,26	13,2	14,14	15,09	16,03
16,97	17,91	18,86	19,8	20,74	21,69	22,63	23,57	24,51	25,46
26,4	27,34	29,12	15,74	16,27	16,79	17,32	17,84	18,37	18,89
19,42	19,94	20,47	20,99	21,52	22,04	22,57	23,09	23,62	24,14
24,66	25,19	25,71	26,24	26,76	27,29	27,81	28,34	28,86	29,39
29,91	30,44	30,96	31,49	32,01	32,54	33,06	33,59	34,11	34,64
35,16	35,69	36,21	36,73	37,26	37,78	38,31	38,83	39,36	39,88
40,41	40,93	41,46	41,98	42,51	43,03	43,56	44,08	44,61	45,13
45,66	46,18	61,26	73,39	55,32	272,19	37,19	37,6	38,02	38,43
38,84	39,26	39,67	40,08	40,5	40,91	41,32	41,73	42,15	42,56
42,97	43,39	43,8	44,21	44,63	63,74	81,18	94,27	286,32	21,23
21,42	21,61	21,8	21,99	22,18	22,37	22,56	22,76	22,95	23,14
23,33	23,52	23,71	23,9	24,09	24,28	24,48	24,67	24,86	25,05
25,24	25,43	25,62	25,81	26,01	26,2	26,39	26,58	26,77	26,96
27,15	27,34	27,54	27,73	27,92	28,11	28,3	28,49	28,68	28,87
29,07	29,26	29,45	29,64	29,83	30,02	30,21	30,4	30,6	30,79
30,98	31,17	31,36	31,55	31,74	31,93	32,12	32,32	32,51	32,7
32,89	33,08	33,27	33,46	33,65	33,85	34,04	34,23	34,42	34,61
34,8	34,99	35,18	35,38	35,57	35,76	35,95	36,14	36,33	36,52

Fonte: Autoria Própria

Tabela 16 - Valores de $w_{(i)}$ obtidos por U2 no processo de seleção do MLWDF

0,15	0,15	0,3	0,44	0,59	0,74	0,89	1,04	1,18	1,33
1,48	1,63	1,78	1,92	2,07	2,22	2,37	2,52	2,66	2,81
2,96	3,11	3,26	3,4	3,55	3,7	3,85	4	4,14	4,29
4,44	4,59	4,74	4,88	5,03	5,18	5,33	5,48	5,63	5,77
5,92	6,07	6,22	6,37	6,51	6,66	6,81	6,96	7,11	7,25
7,4	7,55	7,7	7,85	7,99	8,14	8,29	8,44	8,59	8,73
8,88	9,03	9,18	9,33	9,47	9,62	9,77	9,92	10,07	10,21
10,36	10,51	10,66	10,81	10,95	11,1	11,25	11,4	11,55	11,69
11,84	11,99	12,14	12,29	12,43	12,58	12,73	12,88	13,03	13,17
13,32	13,47	13,62	13,77	13,91	14,06	14,21	14,36	14,51	14,65
14,8	14,95	15,1	15,25	15,4	15,54	15,69	15,84	15,99	16,14
16,28	16,43	16,58	16,73	16,88	17,02	17,17	17,32	17,47	17,62
17,76	17,91	18,06	18,21	18,36	18,5	18,65	18,8	18,95	19,1
19,24	19,39	19,54	19,69	19,84	19,98	20,13	20,28	20,43	20,58
20,72	20,87	21,02	21,17	21,32	21,46	21,61	21,76	21,91	22,06
22,2	22,35	22,5	22,65	22,8	22,94	23,09	23,24	23,39	23,54
23,68	23,83	23,98	24,13	24,28	24,42	24,57	24,72	24,87	25,02
25,16	25,31	25,46	25,61	25,76	25,91	26,05	26,2	26,35	26,5
26,65	26,79	26,94	27,09	27,24	27,39	27,53	27,68	27,83	27,98
28,13	28,27	28,42	28,57	28,72	28,87	29,01	29,16	29,31	29,46

Fonte: Autoria Própria

Tabela 17- Valores de $w_{(t)}$ obtidos por U3 no processo de seleção do MLWDF

1,37	1,37	2,73	4,1	5,47	6,83	8,2	9,56	14,97	5,4
6,17	6,94	7,71	8,48	9,25	10,02	10,8	11,57	12,34	13,11
13,88	14,65	15,42	16,19	16,96	17,73	18,51	19,28	20,05	20,82
21,59	22,36	23,13	23,9	24,67	25,45	26,22	26,99	27,76	28,53
29,3	30,07	22,62	23,2	23,78	24,36	24,94	25,52	26,1	26,68
27,26	27,84	28,42	29	29,58	30,16	30,74	31,32	31,9	32,48
33,06	33,64	34,22	34,8	35,38	35,96	36,54	37,12	37,7	38,28
38,86	39,44	40,02	40,6	41,18	41,76	42,34	42,92	43,5	55,79
32,38	32,81	33,24	33,66	34,09	34,51	34,94	35,37	35,79	36,22
36,64	37,07	37,5	37,92	38,35	38,77	39,2	39,63	40,05	40,48
40,91	41,33	41,76	59,16	74,81	86,45	338,75	131,54	99,77	101,38
251,96	77,97	143,92	90,49	33,07	33,4	33,72	34,05	34,37	34,69
35,02	35,34	35,67	35,99	36,32	36,64	36,96	37,29	37,61	37,94
38,26	38,59	38,91	39,23	39,56	39,88	40,21	40,53	40,85	41,18
41,5	41,83	42,15	42,48	42,8	43,12	43,45	43,77	44,1	44,42
44,75	45,07	45,39	45,72	46,04	46,37	46,69	47,02	47,34	47,66
47,99	48,31	48,64	48,96	49,29	49,61	49,93	50,26	50,58	50,91
51,23	77,86	105,19	127,73	458,74	202,76	180,6	155,73	273,56	108,51
238,25	153,52	59,06	87,1	114,23	385,68	40,76	65,69	94,54	121,2
141,3	835,34	166,72	300,99	38,7	38,92	39,15	39,38	39,61	39,84

Fonte: Autoria Própria

Tabela 18 - Valores de $w_{(t)}$ obtidos por U4 no processo de seleção do MLWDF

1,38	1,38	2,76	4,14	5,52	6,9	11,14	8,28	9,66	11,04
12,42	13,8	14,07	15,48	14,11	15,39	16,67	15,73	16,86	17,98
19,1	20,23	21,35	22,47	23,6	24,72	25,84	26,97	24,02	25,02
26,02	27,02	28,02	29,02	37,6	31,27	39,4	2,68	2,77	2,86
2,96	3,05	3,14	3,23	3,33	3,42	3,51	3,6	3,69	3,79
3,88	3,97	4,06	4,16	4,25	4,34	4,43	4,53	4,62	4,71
4,8	4,9	4,99	5,08	5,17	5,26	5,36	5,45	5,54	5,63
5,73	5,82	5,91	6	6,1	6,19	6,28	6,37	6,47	6,56
6,65	6,74	6,83	6,93	7,02	7,11	7,2	7,3	7,39	7,48
7,57	7,67	7,76	7,85	7,94	8,04	8,13	8,22	8,31	8,4
8,5	8,59	8,68	8,77	8,87	8,96	9,05	9,14	9,24	9,33
9,42	9,51	9,61	9,7	9,79	9,88	9,98	10,07	10,16	10,25
10,34	10,44	10,53	10,62	10,71	10,81	10,9	10,99	11,08	11,18
11,27	11,36	11,45	11,55	11,64	11,73	11,82	11,91	12,01	12,1
12,19	12,28	12,38	12,47	12,56	12,65	12,75	12,84	12,93	13,02
13,12	13,21	13,3	13,39	13,48	13,58	13,67	13,76	13,85	13,95
14,04	14,13	14,22	14,32	14,41	14,5	14,59	14,69	14,78	14,87
14,96	15,06	15,15	15,24	15,33	15,42	15,52	15,61	15,7	15,79
15,89	15,98	16,07	16,16	16,26	16,35	16,44	16,53	16,63	16,72
16,81	16,9	16,99	17,09	17,18	17,27	17,36	17,46	17,55	17,64

Fonte: Autorio Própria

Tabela 19 - Valores de $w_{(i)}$ obtidos por U5 no processo de seleção do MLWDF

0,52	0,52	1,04	1,57	2,09	2,61	3,13	3,65	4,17	4,7
5,22	5,74	6,26	6,78	7,31	7,83	8,35	8,87	9,39	9,91
10,44	10,96	11,48	12	12,52	13,04	13,57	14,09	14,61	15,13
15,65	16,18	16,7	17,22	17,74	18,26	18,78	19,31	19,83	20,35
20,87	21,39	21,92	22,44	22,96	23,48	24	24,52	25,05	25,57
26,09	26,61	27,13	27,65	28,18	28,7	29,22	29,74	30,26	30,79
31,31	31,83	32,35	32,87	33,39	33,92	34,44	34,96	35,48	36
36,53	37,05	37,57	38,09	38,61	39,13	39,66	40,18	40,7	41,22
41,74	42,26	56,23	67,53	75,37	80,39	83,61	255,82	318,69	137,02
62,24	38,98	39,43	39,87	40,32	40,77	41,22	57,55	71,86	285,27
212,58	51,7	19,07	19,27	19,47	19,67	19,88	20,08	20,28	20,49
20,69	20,89	21,09	21,3	21,5	21,7	21,91	22,11	22,31	22,51
22,72	22,92	23,12	23,33	23,53	23,73	23,93	24,14	24,34	24,54
24,75	24,95	25,15	25,35	25,56	25,76	25,96	26,16	26,37	26,57
26,77	26,98	27,18	27,38	27,58	27,79	27,99	28,19	28,4	28,6
28,8	29	29,21	29,41	29,61	29,82	30,02	30,22	30,42	30,63
30,83	31,03	31,24	31,44	31,64	31,84	32,05	32,25	32,45	32,66
32,86	33,06	33,26	33,47	33,67	33,87	34,08	34,28	34,48	34,68
34,89	35,09	35,29	35,49	35,7	35,9	36,1	36,31	36,51	36,71
36,91	37,12	37,32	37,52	37,73	37,93	38,13	38,33	38,54	38,74

Fonte: Autoria Própria

Tabela 20 - Valores de $w_{(i)}$ obtidos por U6 no processo de seleção do MLWDF

0,94	0,94	1,88	2,82	3,76	4,7	5,64	6,58	7,52	8,46
9,4	10,34	11,28	12,22	13,16	14,1	15,04	15,98	17,44	18,7
19,84	43,75	28,82	80,4	30,55	28,35	28,85	26,88	28,16	20,62
21,56	22,5	23,44	24,37	25,31	26,25	27,19	28,12	29,06	30
30,94	23,31	24,02	24,72	25,43	26,14	3,37	3,46	3,55	3,64
3,73	3,82	3,91	4	4,1	4,19	4,28	4,37	4,46	4,55
4,64	4,73	4,82	4,91	5,01	5,1	5,19	5,28	5,37	5,46
5,55	5,64	5,73	5,82	5,92	6,01	6,1	6,19	6,28	6,37
6,46	6,55	6,64	6,73	6,83	6,92	7,01	7,1	7,19	7,28
7,37	7,46	7,55	7,64	7,74	7,83	7,92	8,01	8,1	8,19
8,28	8,37	8,46	8,55	8,65	8,74	8,83	8,92	9,01	9,1
9,19	9,28	9,37	9,46	9,56	9,65	9,74	9,83	9,92	10,01
10,1	10,19	10,28	10,37	10,47	10,56	10,65	10,74	10,83	10,92
11,01	11,1	11,19	11,28	11,38	11,47	11,56	11,65	11,74	11,83
11,92	12,01	12,1	12,19	12,29	12,38	12,47	12,56	12,65	12,74
12,83	12,92	13,01	13,1	13,2	13,29	13,38	13,47	13,56	13,65
13,74	13,83	13,92	14,01	14,11	14,2	14,29	14,38	14,47	14,56
14,65	14,74	14,83	14,92	15,02	15,11	15,2	15,29	15,38	15,47
15,56	15,65	15,74	15,83	15,93	16,02	16,11	16,2	16,29	16,38
16,47	16,56	16,65	16,74	16,84	16,93	17,02	17,11	17,2	17,29

Fonte: Autoria Própria

Tabela 21 - Valores de $w_{(i)}$ obtidos por U7 no processo de seleção do MLWDF

4,41	4,41	3,26	4,89	6,52	5,57	6,96	8,36	9,75	11,14
12,54	10,9	12,12	13,33	14,54	15,75	7,42	7,99	8,57	9,14
9,71	10,28	10,85	11,42	11,99	12,56	13,13	13,7	14,28	14,85
15,42	15,99	16,56	17,13	17,7	18,27	18,84	19,42	19,99	20,56
21,13	21,7	22,27	22,84	23,41	23,98	24,55	25,13	25,7	26,27
26,84	27,41	27,98	28,55	29,12	29,69	30,27	30,84	31,41	31,98
32,55	33,12	33,69	34,26	34,83	35,4	35,98	36,55	37,12	37,69
38,26	38,83	39,4	39,97	40,54	41,11	41,69	42,26	42,83	43,4
43,97	28,9	29,28	29,66	30,03	30,41	30,78	31,16	31,53	31,91
32,28	32,66	33,03	33,41	33,78	34,16	34,54	34,91	35,29	35,66
36,04	36,41	36,79	37,16	37,54	37,91	38,29	38,66	39,04	39,42
39,79	40,17	40,54	40,92	41,29	41,67	42,04	42,42	42,79	43,17
43,54	43,92	44,3	44,67	45,05	45,42	45,8	46,17	46,55	46,92
47,3	47,67	48,05	48,42	48,8	49,18	49,55	49,93	50,3	50,68
51,05	51,43	51,8	52,18	52,55	52,93	53,3	53,68	54,06	54,43
54,81	55,18	55,56	55,93	56,31	56,68	57,06	57,43	57,81	184,76
260,29	194,77	251	142,72	139,64	133,01	185,26	132,01	78,96	105,3
34,38	34,6	34,82	35,04	35,26	35,48	35,7	35,92	36,14	36,36
36,58	36,8	37,02	37,24	37,46	37,68	37,9	38,12	38,34	38,56
38,78	39	39,22	39,44	39,67	526,41	68,02	99,28	128,94	351,64

Fonte: Autoria Própria

Tabela 22 - Valores de $w_{(i)}$ obtidos por U8 no processo de seleção do MLWDF

0,79	0,79	1,57	2,36	3,14	3,93	4,71	5,5	6,29	7,07
7,86	8,64	9,43	10,21	11	11,78	12,57	13,36	14,14	14,93
15,71	16,5	17,28	18,07	18,86	19,64	20,43	21,21	22	22,78
23,57	24,36	25,14	25,93	26,71	27,5	28,28	29,07	33,44	179,43
26,3	26,99	27,69	33,54	25,03	25,64	26,26	43,64	44,32	87,98
48,45	47,16	46,75	44,17	39,78	69,92	63	34,1	52,11	37,5
20,11	20,56	21,01	21,46	21,9	22,35	22,8	23,24	23,69	24,14
24,58	25,03	25,48	25,93	26,37	26,82	27,27	27,71	28,16	28,61
29,05	29,5	29,95	30,4	30,84	31,29	31,74	32,18	32,63	33,08
33,52	33,97	34,42	34,87	35,31	35,76	36,21	36,65	37,1	37,55
37,99	38,44	38,89	39,34	39,78	40,23	40,68	41,12	41,57	42,02
42,46	42,91	43,36	43,81	44,25	44,7	45,15	45,59	46,04	46,49
46,93	47,38	47,83	48,28	48,72	49,17	49,62	50,06	50,51	50,96
51,4	51,85	52,3	52,75	53,19	53,64	54,09	54,53	240,25	114,42
76,89	95,11	13,22	13,33	13,44	13,55	13,65	13,76	13,87	13,98
14,08	14,19	14,3	14,41	14,51	14,62	14,73	14,84	14,94	15,05
15,16	15,27	15,37	15,48	15,59	15,7	15,8	15,91	16,02	16,13
16,23	16,34	16,45	16,56	16,66	16,77	16,88	16,99	17,09	17,2
17,31	17,42	17,52	17,63	17,74	17,85	17,95	18,06	18,17	18,28
18,38	18,49	18,6	18,71	18,81	18,92	19,03	19,14	19,24	19,35

Fonte: Autoria Própria

Tabela 23 - Valores de $w_{(i)}$ obtidos por U9 no processo de seleção do MLWDF

2,14	2,14	4,28	1,84	2,75	3,67	4,59	5,51	6,42	7,34
8,26	9,18	10,1	11,01	11,93	12,85	13,77	14,68	15,6	16,52
17,44	18,36	19,27	20,19	21,11	22,03	22,94	23,86	24,78	25,7
27,76	18,62	19,27	19,91	20,55	21,19	21,83	22,48	23,12	23,76
24,4	25,05	25,69	26,33	26,97	25,45	26,06	26,66	27,27	27,87
28,48	29,09	29,69	30,3	30,9	31,51	32,12	32,72	33,33	33,93
34,54	43,77	50,75	56,5	58,7	60,33	36,61	46,51	54	59,08
386,78	102,86	80,37	44,01	72,03	51,43	57,92	72,74	11,55	11,73
11,91	12,08	12,26	12,44	12,62	12,8	12,97	13,15	13,33	13,51
13,68	13,86	14,04	14,22	14,39	14,57	14,75	14,93	15,11	15,28
15,46	15,64	15,82	15,99	16,17	16,35	16,53	16,7	16,88	17,06
17,24	17,42	17,59	17,77	17,95	18,13	18,3	18,48	18,66	18,84
19,02	19,19	19,37	19,55	19,73	19,9	20,08	20,26	20,44	20,61
20,79	20,97	21,15	21,33	21,5	21,68	21,86	22,04	22,21	22,39
22,57	22,75	22,92	23,1	23,28	23,46	23,64	23,81	23,99	24,17
24,35	24,52	24,7	24,88	25,06	25,23	25,41	25,59	25,77	25,95
26,12	26,3	26,48	26,66	26,83	27,01	27,19	27,37	27,55	27,72
27,9	28,08	28,26	28,43	28,61	28,79	28,97	29,14	29,32	29,5
29,68	29,86	30,03	30,21	30,39	30,57	30,74	30,92	31,1	31,28
31,45	31,63	31,81	31,99	32,17	32,34	32,52	32,7	32,88	33,05

Fonte: Autoria Própria

Tabela 24 - Valores de $w_{(i)}$ obtidos por U10 no processo de seleção do MLWDF

20,71	0,39	0,39	0,79	1,18	1,58	1,97	2,37	2,76	3,16
3,55	3,94	4,34	4,73	5,13	5,52	5,92	6,31	6,71	7,1
7,49	7,89	8,28	8,68	9,07	9,47	9,86	10,26	10,65	11,04
11,44	11,83	12,23	12,62	13,02	13,41	13,81	14,2	14,6	14,99
15,38	15,78	16,17	16,57	16,96	17,36	17,75	18,15	18,54	18,93
19,33	19,72	20,12	20,51	20,91	21,3	21,7	22,09	22,48	22,88
23,27	23,67	24,06	24,46	24,85	25,25	25,64	26,03	26,43	26,82
27,22	27,61	28,01	28,4	28,8	29,19	29,58	29,98	30,37	30,77
31,16	31,56	31,95	32,35	32,74	33,13	33,53	33,92	34,32	34,71
35,11	35,5	35,9	36,29	36,69	37,08	37,47	37,87	38,26	38,66
39,05	39,45	39,84	40,24	40,63	41,02	41,42	41,81	42,21	42,6
43	43,39	43,79	44,18	44,57	44,97	45,36	45,76	46,15	46,55
67,33	86,72	101,52	111,32	393,31	315,3	63,58	58,01	85,76	155,93
138,02	250,96	174,93	132,56	163,29	85,66	101,81	50,16	50,57	50,97
51,38	51,78	52,19	74,89	59,04	81,82	101,5	115,63	124,64	631,2
75,17	97,03	283,24	197,44	106,95	120,23	179,06	204,71	25,48	25,67
25,85	26,04	26,23	26,41	26,6	26,79	26,98	27,16	27,35	27,54
27,73	27,91	28,1	28,29	28,48	28,66	28,85	29,04	29,22	29,41
29,6	29,79	29,97	30,16	30,35	30,54	30,72	30,91	31,1	31,29
31,47	31,66	31,85	32,03	32,22	32,41	32,6	32,78	32,97	33,16

Fonte: Autoria Própria

A ordem de seleção dos usuários resultada pelo MLWDF é mostrada na Figura 46.

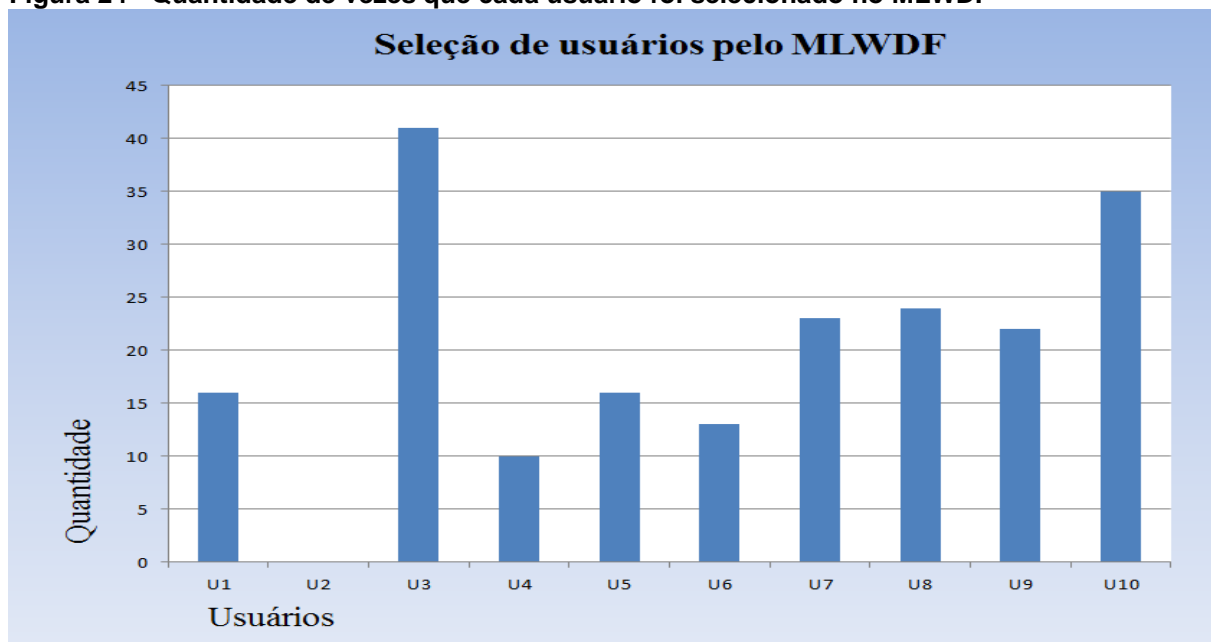
Tabela 25 - Ordem de seleção dos usuários no MLWDF

U10	U7	U9	U1	U7	U4	U4	U3	U3	U1
U7	U4	U1	U4	U1	U7	U4	U6	U6	U6
U6	U6	U6	U6	U6	U6	U6	U4	U6	U9
U9	U1	U1	U4	U4	U4	U4	U8	U8	U8
U6	U3	U8	U8	U9	U6	U8	U8	U8	U8
U8	U8	U8	U8	U8	U8	U8	U8	U8	U8
U9	U9	U9	U9	U9	U9	U9	U9	U9	U9
U9	U9	U9	U9	U9	U9	U9	U9	U3	U3
U7	U5	U5	U5	U5	U5	U5	U5	U5	U5
U5	U1	U1	U1	U1	U1	U5	U5	U5	U5
U5	U5	U3	U3	U3	U3	U3	U3	U3	U3
U3	U3	U3	U3	U1	U1	U1	U1	U1	U10
U10	U10	U10	U10	U10	U10	U10	U10	U10	U10
U10	U10	U10	U10	U10	U10	U10	U8	U8	U8
U8	U8	U10	U10	U10	U10	U10	U10	U10	U10
U10	U10	U10	U10	U10	U10	U10	U10	U7	U7
U7	U7	U7	U7	U7	U7	U7	U7	U7	U7
U3	U3	U3	U3	U3	U3	U3	U3	U3	U3
U3	U3	U3	U3	U3	U3	U3	U3	U3	U3
U3	U3	U3	U3	U7	U7	U7	U7	U7	U7

Fonte: Autoria Própria

No MLWDF, a diferença na seleção dos usuários é mais notada se comparada com o RR e PF, pois a preferência de seleção está nos usuários que possuem maior *delay* de pacote e com um valor de $\left(\frac{r_i(t)}{R_i(t)}\right)$ significativo. O usuário U2 não foi selecionado em nenhum momento da simulação, isso provavelmente ocorreu pela qualidade do seu canal, se aumentássemos o tempo de simulação em algum momento o mesmo seria selecionado, pois seu *delay* iria aumentar expressivamente. A Figura 47 mostra a quantidade de vezes que cada usuário foi selecionado pelo MLWDF.

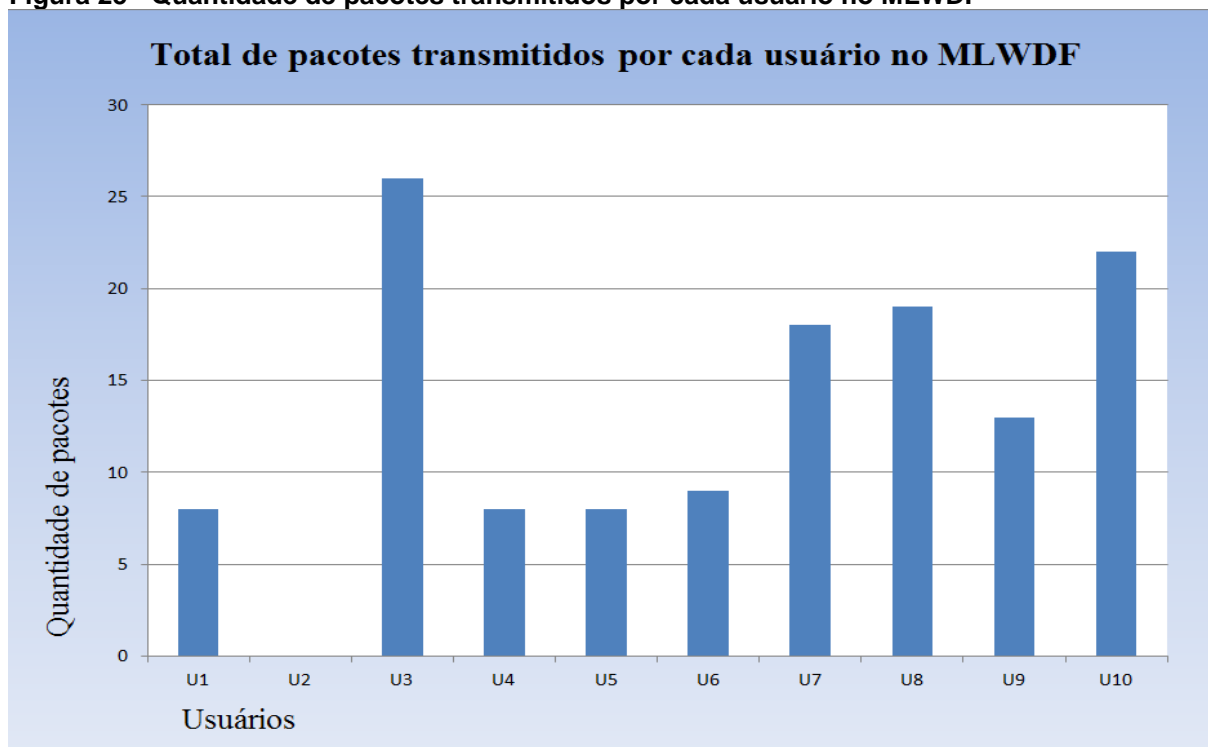
Figura 24 - Quantidade de vezes que cada usuário foi selecionado no MLWDF



Fonte: Autoria Própria

A Figura 48 mostra a quantidade de pacotes transmitidos pelo usuários no MLWDF.

Figura 25 - Quantidade de pacotes transmitidos por cada usuário no MLWDF



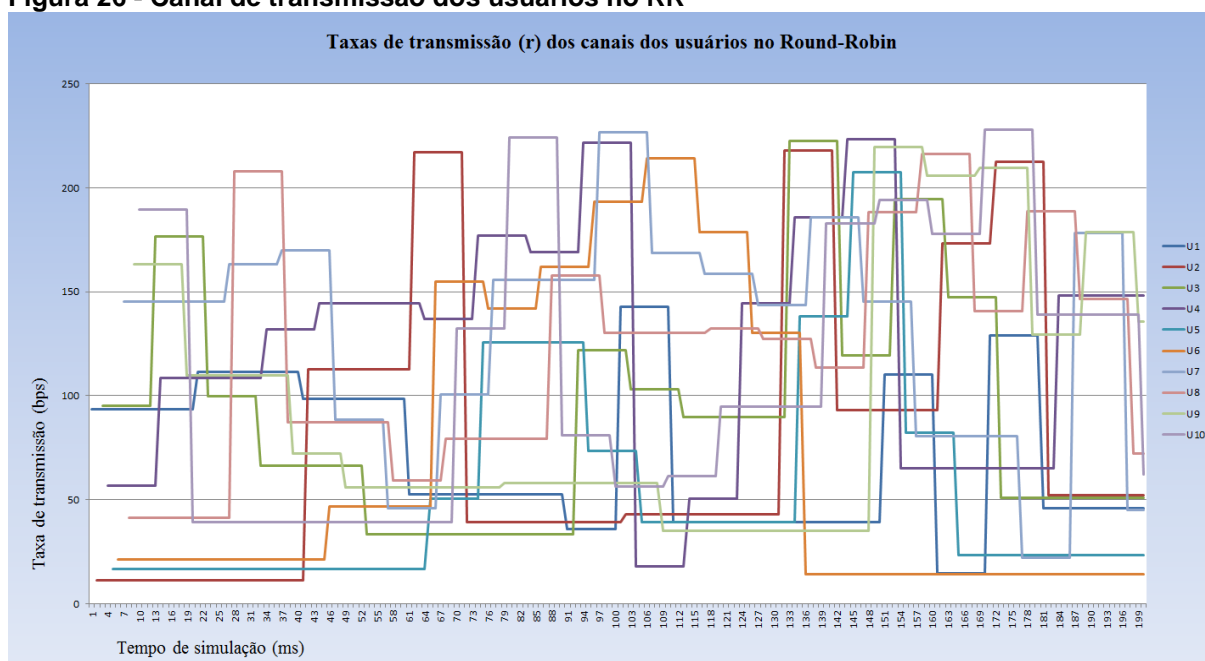
Fonte: Autoria Própria

A quantidade de pacotes transmitidos pelo RR e pelo PF foi simliar, contudo no MLWDF esse resultado foi mais notório, visto que os usuários U3 e U10 foram os mais selecionados.

4.2 CANAL DE TRANSMISSÃO DOS USUÁRIOS

Nesta seção são mostrados os canais de transmissão de cada usuário nos instantes em foram selecionados em todos os escalonadores. A Figura 49 traz os valores instantâneo dos canais de cada usuário no RR.

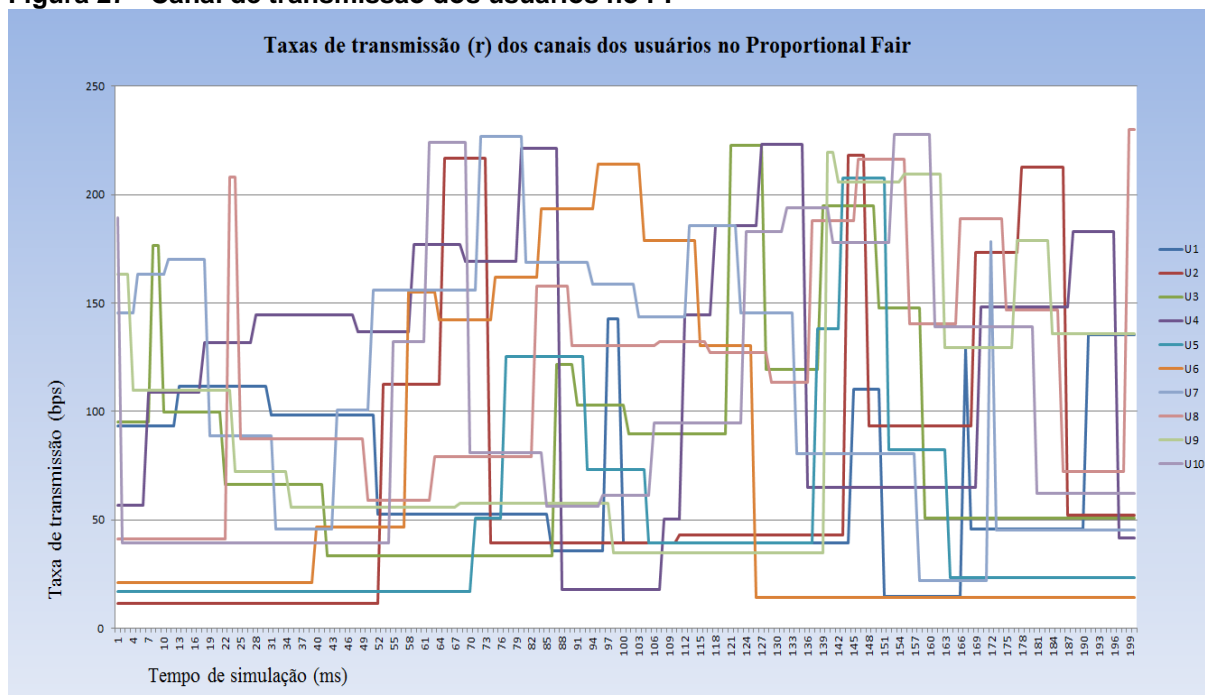
Figura 26 - Canal de transmissão dos usuários no RR



Fonte: Autoria Própria

O canal de transmissão dos usuários no PF são mostrados na Figura 50.

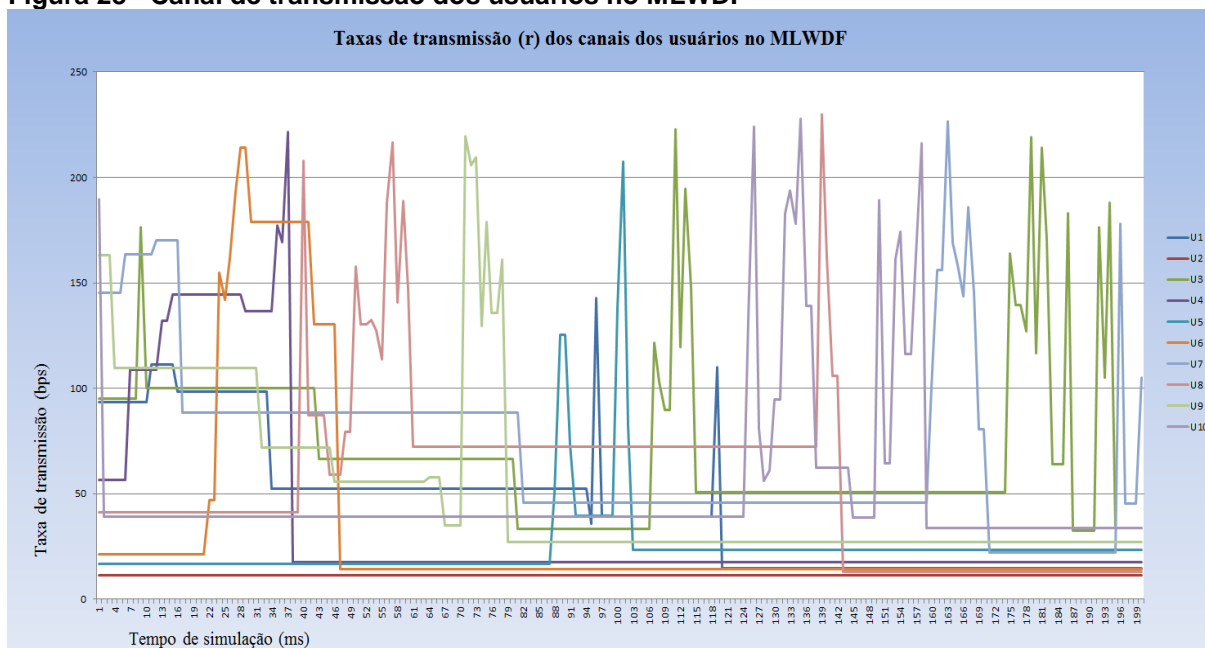
Figura 27 - Canal de transmissão dos usuários no PF



Fonte: Autoria Própria

O canal de transmissão dos usuários no MLWDF são mostrados na Figura 51.

Figura 28 - Canal de transmissão dos usuários no MLWDF



Fonte: Autoria Própria

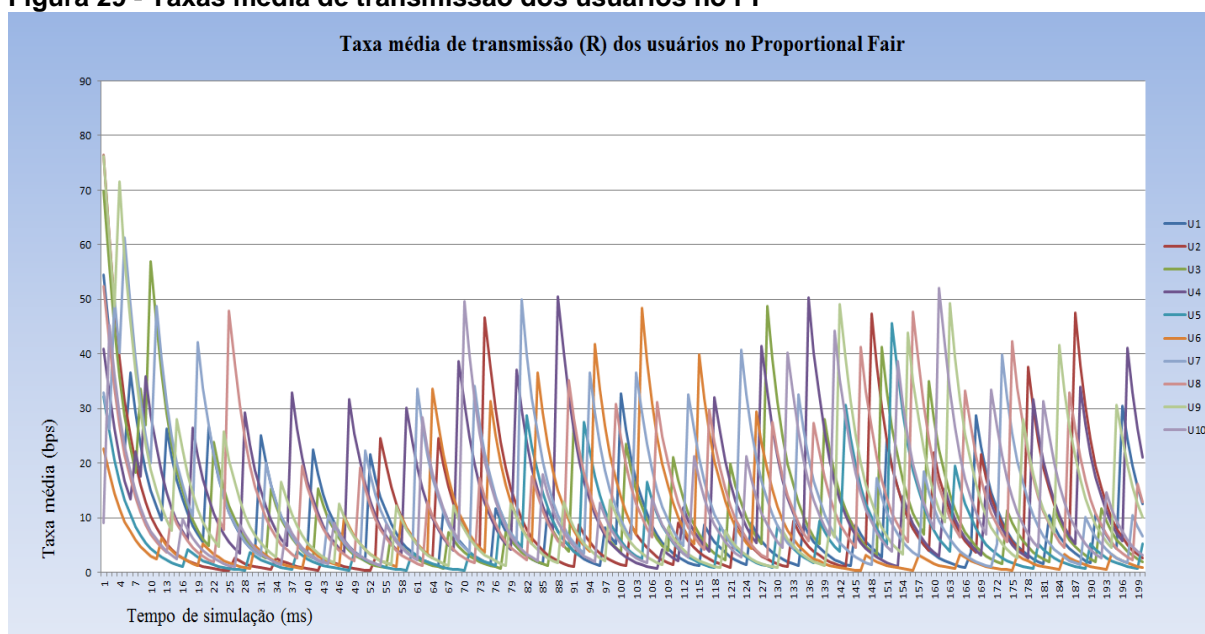
O RR e PF, obtiveram seus canais instantâneos similares, pois os usuários selecionados por esses dois escalonadores foram parecidos. O mesmo não ocorreu

para o MLWDF, visto que a política de seleção desse escalonador prioriza o tráfego com maior delay.

4.3 TAXA MÉDIA DE TRANSMISSÃO (R)

Nesta seção são mostradas as taxas média de transmissão de cada usuário nos instantes que foram selecionados, contudo, apenas o PF e MLWDF possuem esses valores, devido os mesmos utilizarem-os no processo de seleção. A Figura 52 mostra as taxas média de transmissão dos usuários no PF.

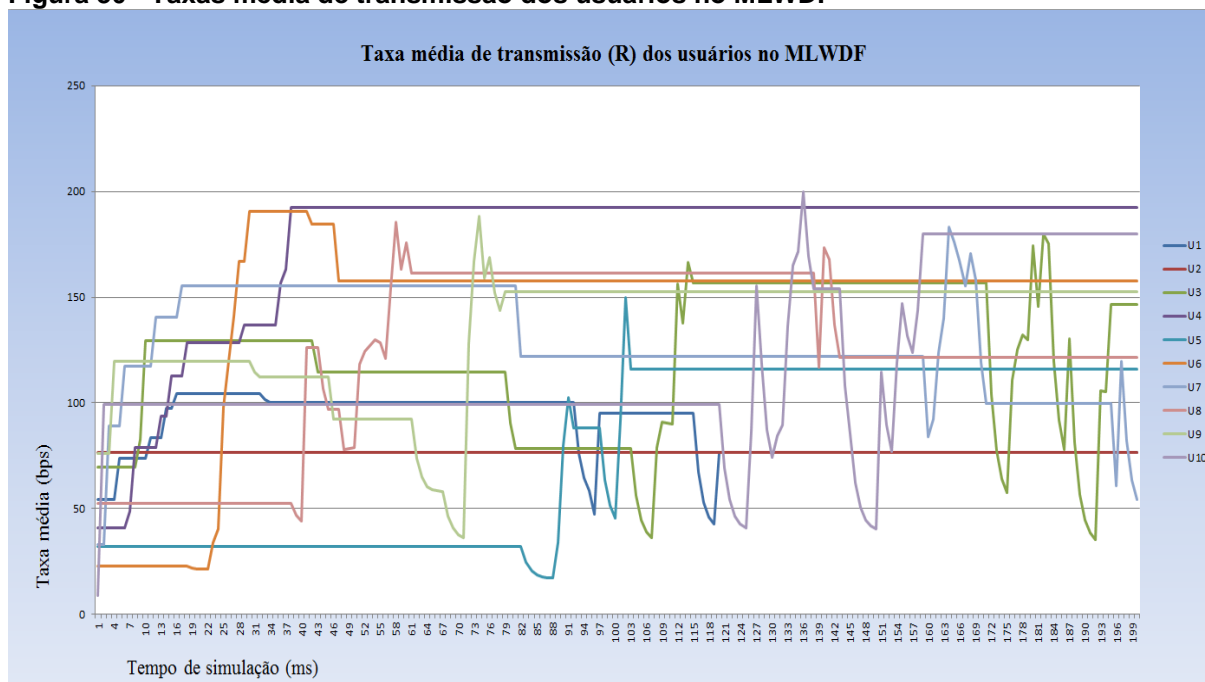
Figura 29 - Taxas média de transmissão dos usuários no PF



Fonte: Autoria Própria

A Figura 53 traz as taxas média de transmissão dos usuários no PF.

Figura 30 - Taxas média de transmissão dos usuários no MLWDF



Fonte: Autoria Própria

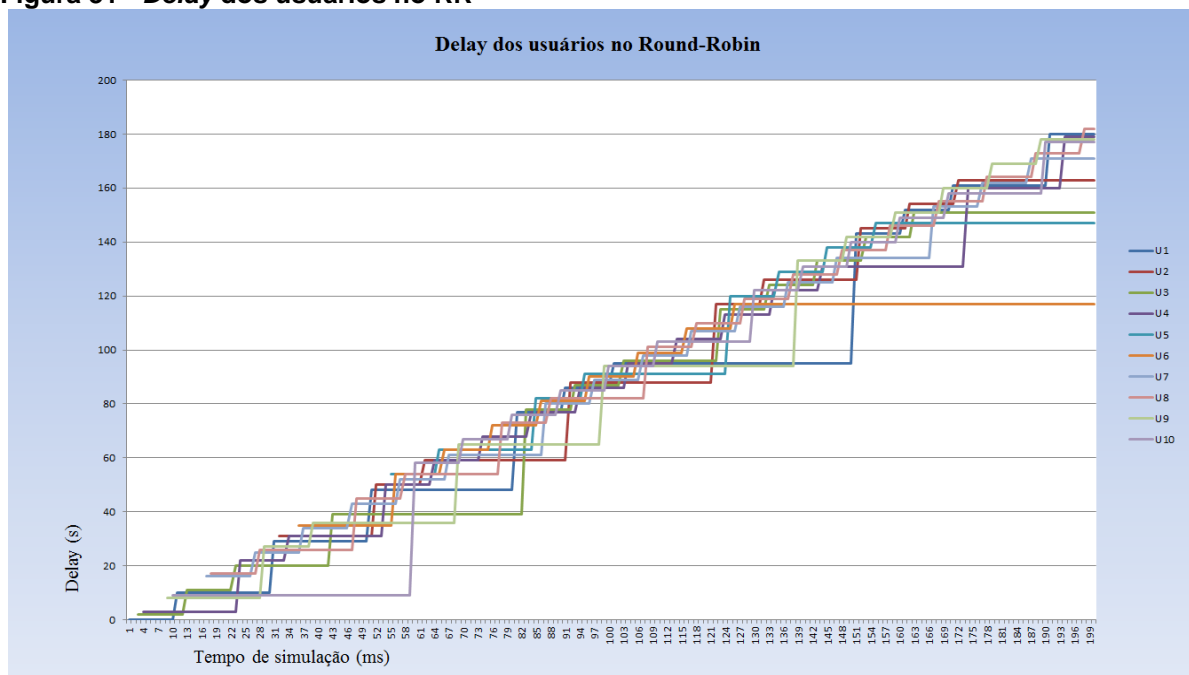
Os usuários no MLWDF obtiveram as maiores taxas de transmissão, pelo fato de que alguns usuários foram selecionados acima da média.

4.4 DELAY

Nesta seção são mostrados os resultados de *delay* obtidos pelos três algoritmos no decorrer das simulações.

O *delay* dos usuários do RR foi o maior da simulação, isso ocorreu pelo fato dos usuários serem selecionados sequencialmente, por exemplo, se um usuário é selecionado no instante 1 da simulação o mesmo apenas voltará a transmitir no instante 11, considerando um cenário com 10 usuários. Isso provoca o aumento do *delay* dos pacotes. A Figura 54 mostra os valores de *delay* obtidos pelos usuários no RR.

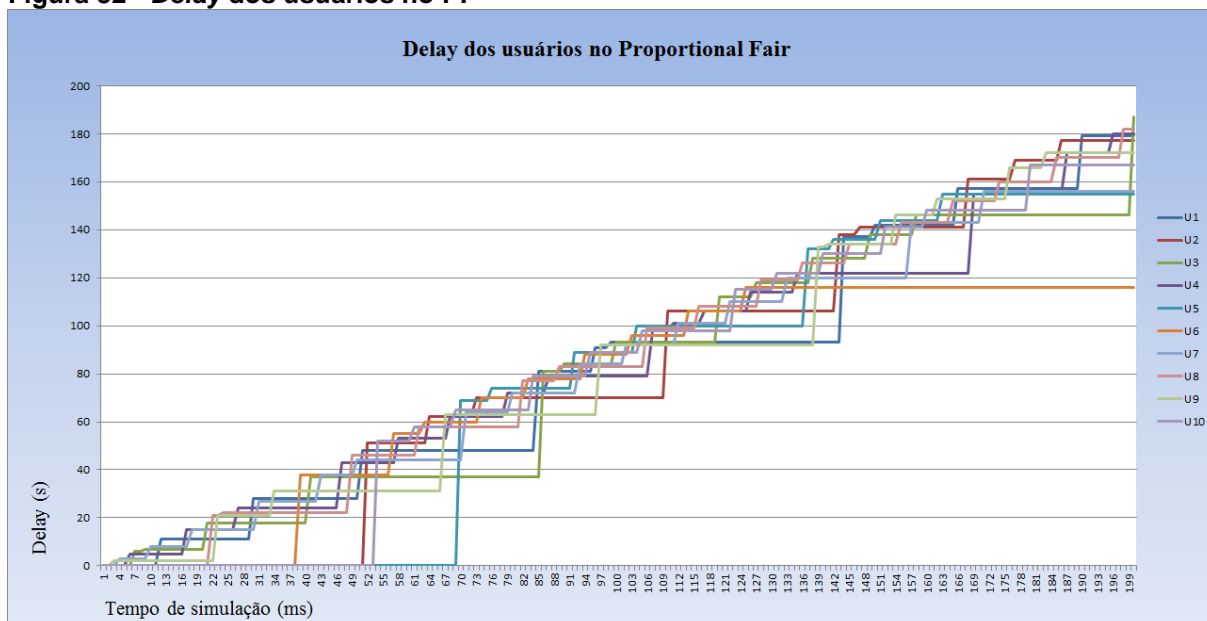
Figura 31 - Delay dos usuários no RR



Fonte: Autoria Própria

O *delay* resultante no PF em relação ao RR foi um pouco menor, pois o mesmo busca selecionar os usuários que possuem uma boa qualidade de transmissão, ou seja, os melhores valores de $W_{(i)}$. Assim, os usuários que possuem valores baixos, levaram um maior tempo para serem selecionados e conseqüentemente o delay tende a crescer. A Figura 55 mostra os valores de *delay* obtidos pelos usuários no PF.

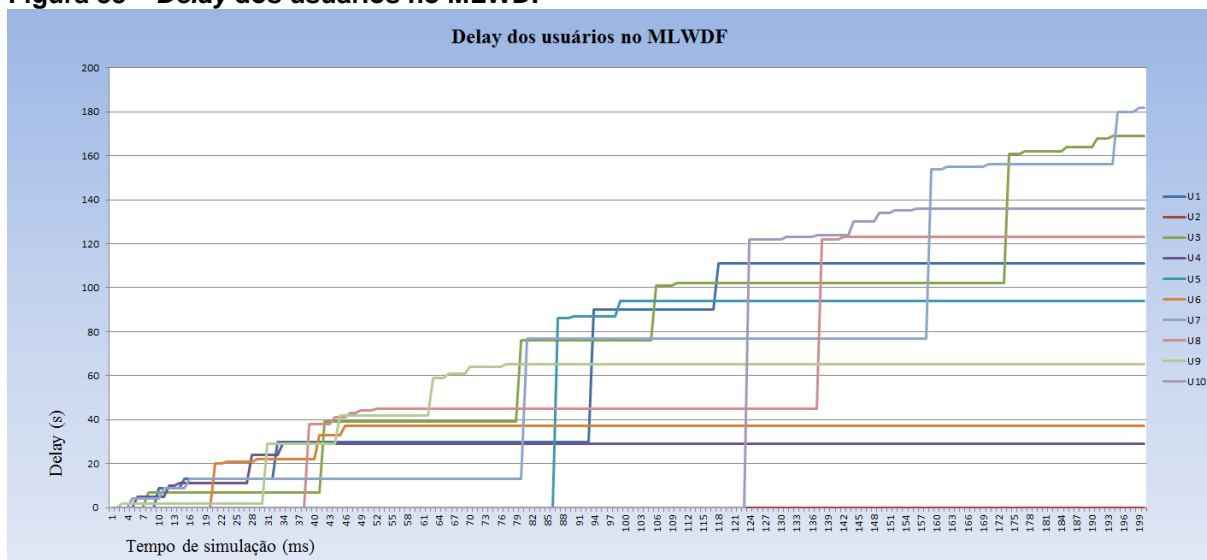
Figura 32 - Delay dos usuários no PF



Fonte: Autoria Própria

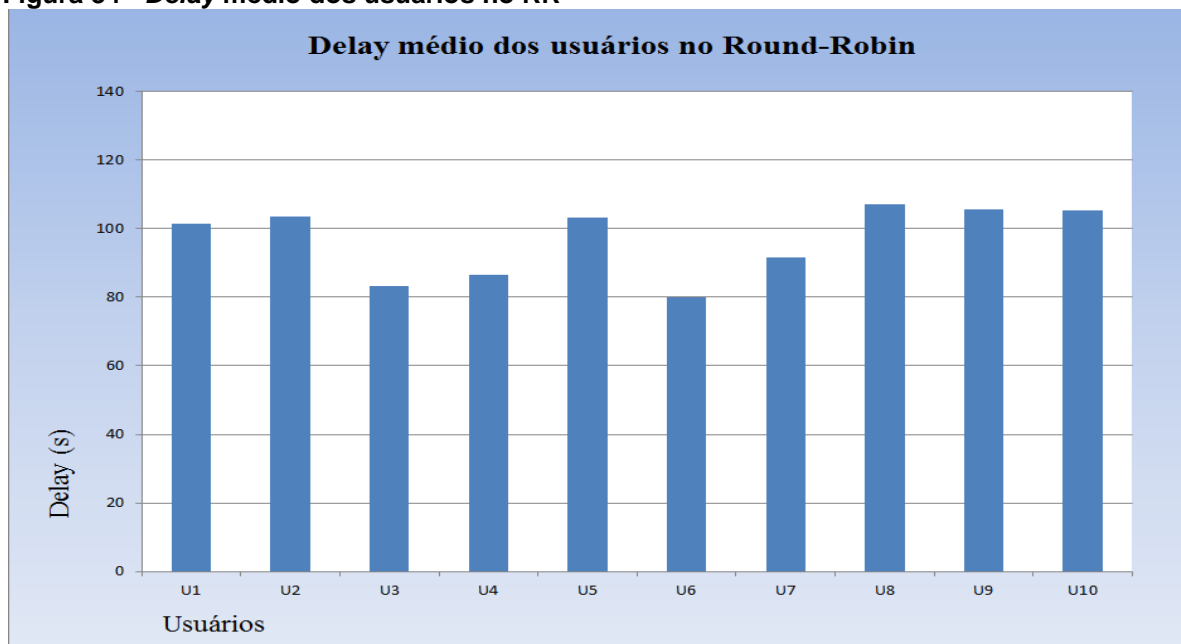
O MLWDF foi o escalonador que apresentou o menor valor de *delay* em comparação aos outros dois, pois esse algoritmo possui preferência de seleção para os usuários com maior atraso e com um taxa de transmissão significativa. A Figura 56 traz os valores de *delay* obtidos pelos usuários no MLWDF.

Figura 33 – Delay dos usuários no MLWDF



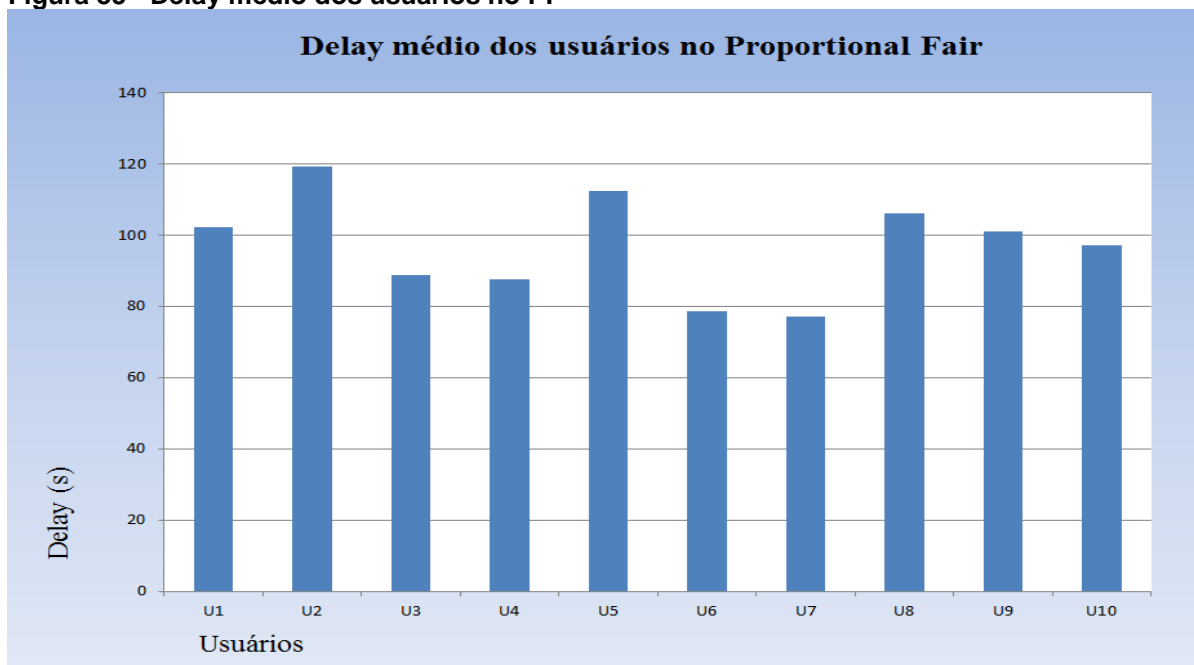
Fonte: Autoria Própria

Também foi realizado o cálculo do *delay* médio para todos os usuários e nos três escalonadores. A Figura mostra 57 o *delay* médio dos usuários no RR.

Figura 34 - *Delay* médio dos usuários no RR

Fonte: Autoria Própria

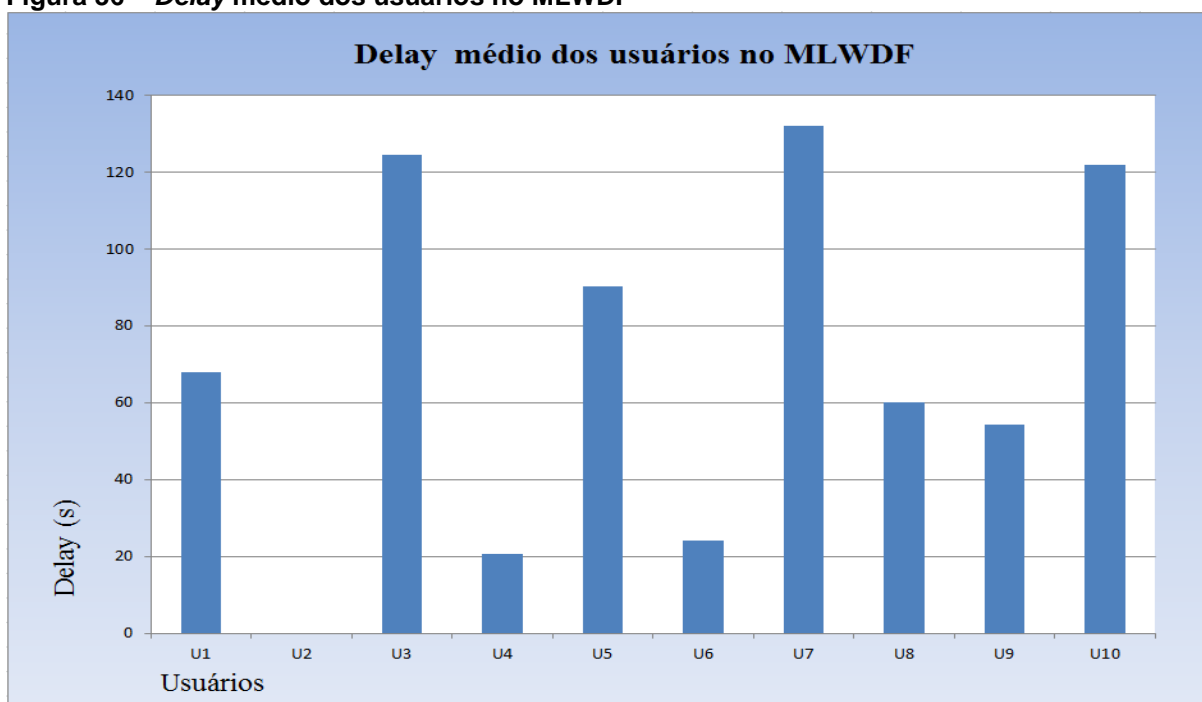
A Figura 58 traz o *delay* médio dos usuários no PF.

Figura 35 - *Delay* médio dos usuários no PF

Fonte: Autoria Própria

A Figura 59 traz o *delay* médio dos usuários no MLWDF.

Figura 36 – *Delay* médio dos usuários no MLWDF



Fonte: Autoria Própria

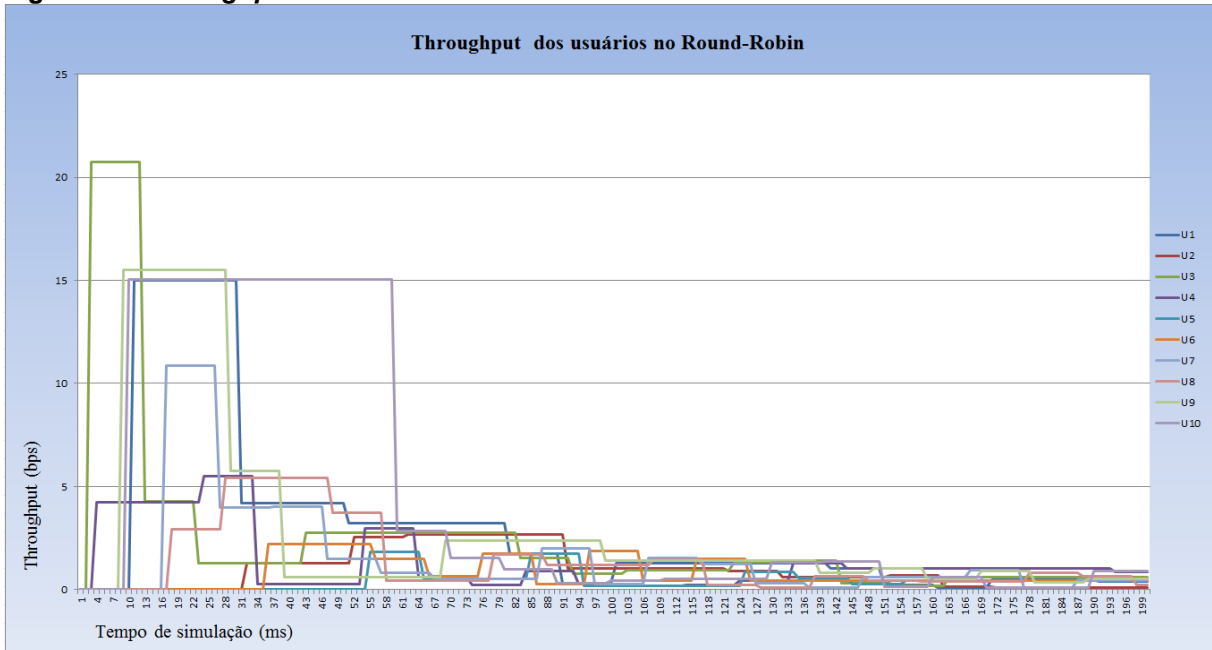
Na Figura 59 é notado, que os usuários que foram mais vezes selecionados no MLWDF, possuem maior média de *delay*, isso mostra o comportamento de seleção desse algoritmo, buscando selecionador os usuários com maior tempo de atraso.

4.5 THROUGHPUT

Nesta seção são discutidos os resultados de *throughput* obtidos pelos três escalonadores implementados.

O RR obteve o pior valor de *throughput* das simulações, isso ocorreu porque todos usuários possuem a mesma preferência de seleção. Então, a ocorrência de usuários com baixas taxas de transmissão é mais frequente. A Figura 60 traz os valores de *throughput* obtidos pelos usuários no RR.

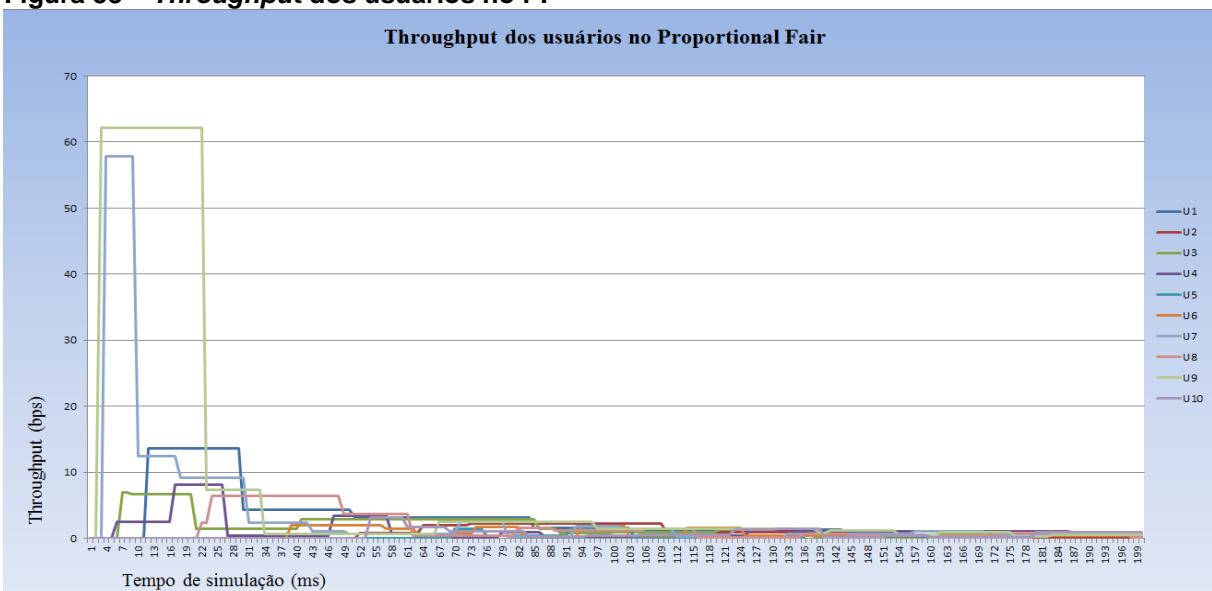
Figura 37 - *Throughput* dos usuários no PF



Fonte: Autoria Própria

O PF obteve o segundo maior valor de *throughput* das simulações, isso mostra que o algoritmo se preocupa em selecionar os melhores usuários do cenário. A Figura 61 traz os valores de *throughput* obtidos pelos usuários no PF.

Figura 38 – *Throughput* dos usuários no PF

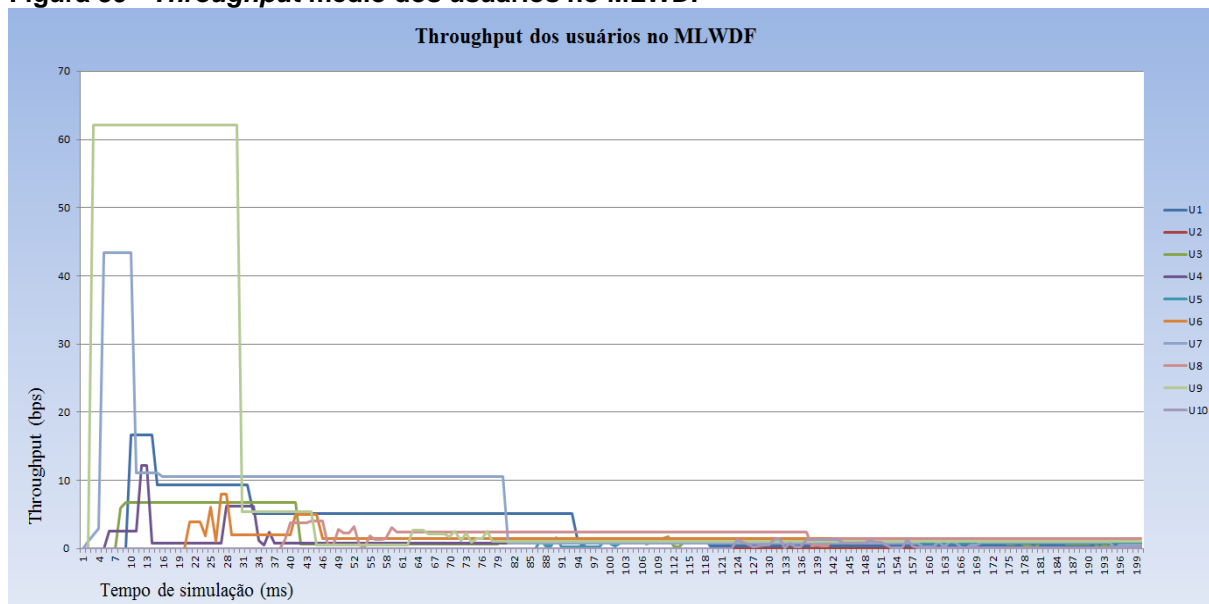


Fonte: Autoria Própria

O MLWDF obteve o melhor valor de *throughput*, pois o mesmo se inspira em partes no PF, contudo possui maior preferência pelos usuários com maior *delay*. A

Figura 62 mostra os valores de *throughput* obtidos pelos usuários no MLWDF, ao longo da simulação.

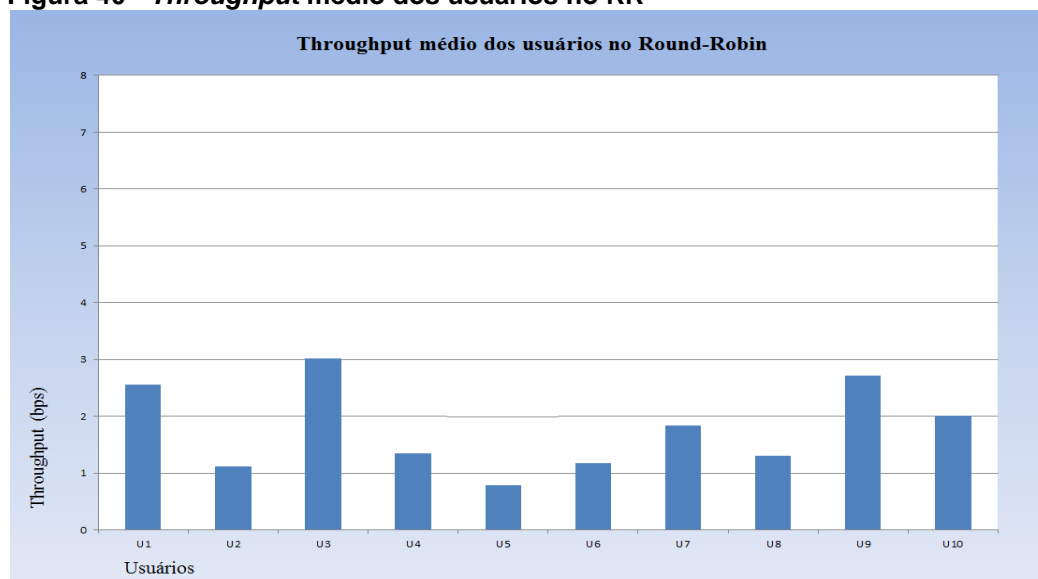
Figura 39 - *Throughput* médio dos usuários no MLWDF



Fonte: Autoria Própria

Também foi realizado o cálculo do *throughput* médio para cada usuário. A Figura 63 mostra o *throughput* médio dos usuários no RR.

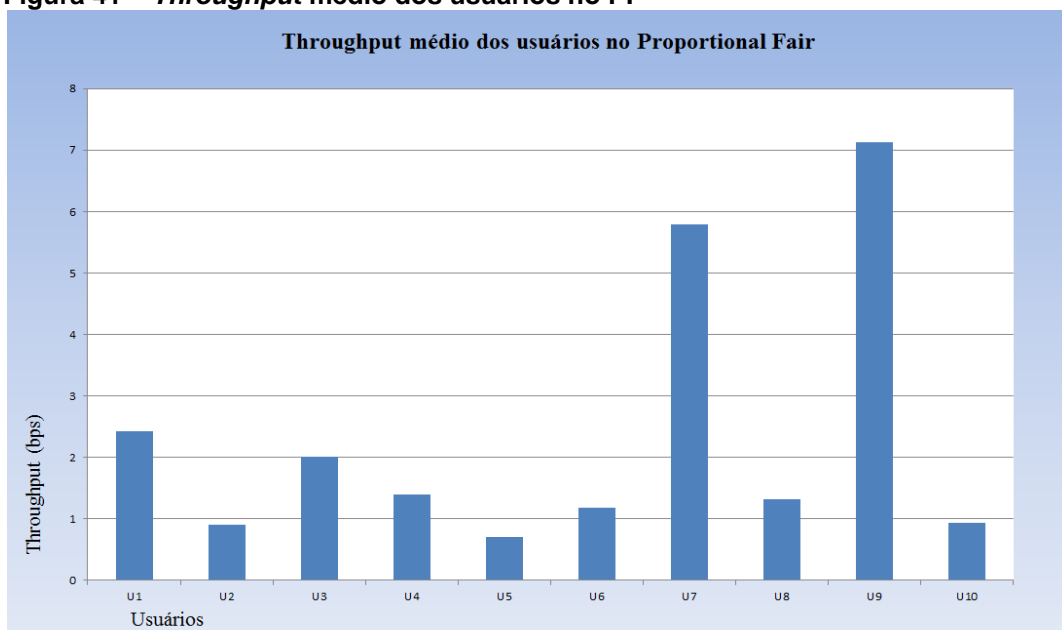
Figura 40 - *Throughput* médio dos usuários no RR



Fonte: Autoria Própria

A Figura 64 mostra o *throughput* médio dos usuários no PF.

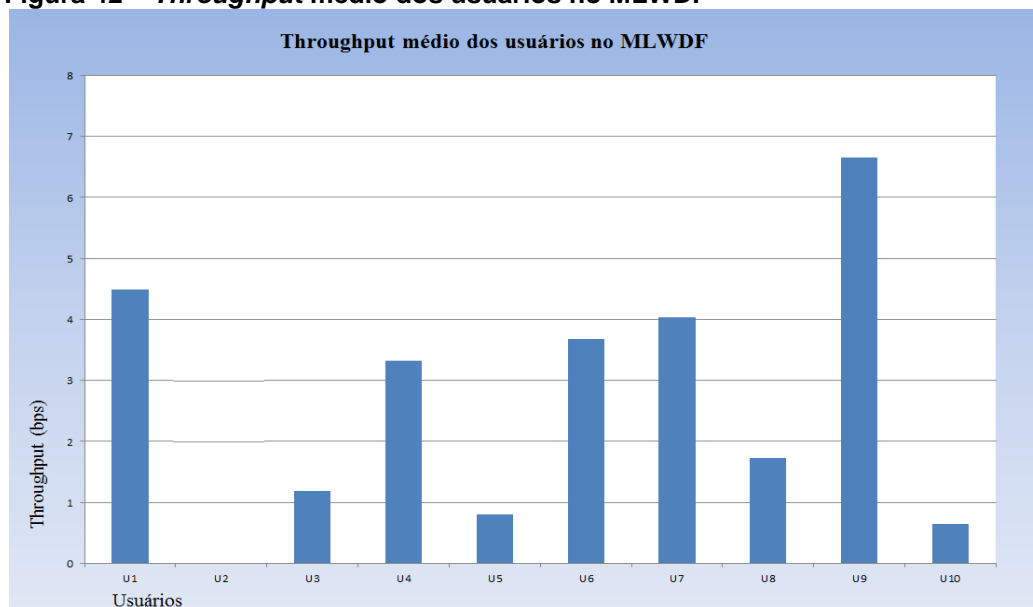
Figura 41 – *Throughput* médio dos usuários no PF



Fonte: Autoria Própria

A Figura 65 mostra o *throughput* médio dos usuários no MLWDF.

Figura 42 – *Throughput* médio dos usuários no MLWDF



Fonte: Autoria Própria

O MLWDF e o PF obtiveram as melhores médias de *throughput*, enquanto, o RR obteve a pior.

5 CONCLUSÃO

O simulador desenvolvido nesse trabalho possibilitou a análise de desempenho de três algoritmos escalonadores de pacotes, empregados em redes LTE. Cada escalonador possui uma aplicabilidade distinta. O RR é o algoritmo menos custoso computacionalmente, pelo motivo de não realizar nenhum cálculo na seleção dos usuários, no qual, a distribuição dos recursos da rede é de maneira sequencial. Entretanto, o RR apresentou o pior desempenho das simulações, considerando *delay* e *throughput*. Esse tipo de escalonador pode ser aplicado no tráfego de voz, visto que os dados transmitidos são menores.

O PF apresentou o segundo melhor resultado em termos de *throughput*, embora um dos usuários obteve o maior valor de *throughput* da simulação, a média de transmissão do MLWDF foi maior. Esse escalonador pode ser utilizado para tráfego de dados em geral, da Internet, considerando dados multimídia e jogos *online*.

Entretanto, o algoritmo que apresentou maior potencial para transmissão de dados e com baixo valor de *delay*, foi o MLWDF. Esse escalonador se preocupa com o atraso dos pacotes, buscando reduzir o *delay* da rede. Dentre as aplicabilidades deste escalonador estão o tráfego multimídia, jogos *online*, em que o tempo de entrega dos pacotes é de extrema importância para qualidade do serviço, e demais tráfegos da Internet.

Contudo os escalonadores PF e MLWDF consomem mais recursos computacionais do equipamento transmissor, em especial o MLWDF, pelo motivo que a cada iteração desse algoritmo é necessário realizar o cálculo da razão entre a taxa instantânea pela taxa média transmitida, e também o cálculo de *delay* instantâneo dos pacotes, para todos os usuários.

Esse estudo possibilitou a compreensão do funcionamento desses três escalonadores de pacotes, mostrando a dinâmica de seleção, desempenho em termos de *delay* e *throughput* e as aplicabilidades de cada escalonador.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Análise considerando diferentes tipos de tráfegos de dados.
- Implementação de outros escalonadores.
- Utilização do *frame* FDD.
- Implementação de um ambiente gráfico para simulação.

REFERÊNCIAS

ANDREWS, M. *et al.* **Cdma data qos scheduling on the forward link with variable channel conditions**. In: .[s.n], 2000. Disponível em: <<http://ect.bell-labs.com/who/stolyar/publications/>>. Acesso em: 8 nov. 2016.

ANRITSU. **LTE Resource Guide**. 2009. Disponível em: <http://web.cecs.pdx.edu/~fli/class/LTE_Reource_Guide.pdf>. Acesso em: 28 out. 2016.

BEZERRA, E. **Princípios de Análise e Projeto de Sistemas com UML**. [S.l.]: Campus, 2015.

ERICSSON. **Ericsson Mobility Report On The Pulse Of The Networked Society**. 2016. Disponível em: <<https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2016/ericsson-mobility-report-november-2016.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2016.

FILHO, C. A. L. B. **Análise de Desempenho do Protocolo TCP em Redes LTE**. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) — Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.pel.uerj.br/bancodissertacoes/Dissertacao_Carlos_Alberto_Leite_Bello_Filho.pdf>. Acesso em: 23 out. 2016.

HALL, P. **Java - Como Programar**. [S.l.]: PEARSON, 2010.

KUROSE, J. F. **Redes de Computadores e a Internet: Uma Abordagem Top-Down**. [S.l.]: PEARSON, 2011. ISBN 978-85-88639-97-3.

MANNANI, D. **Modeling and Simulation of Scheduling Algorithms in LTE Networks**. 63 f. BSc. Thesis — Warsaw University Of Technology, Warsaw, 2012. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/IS-Wireless/modeling-and-simulation-of-scheduling-algorithms-in-lte-networks-by-dinesh-mannani>>. Acesso em: 01 nov. 2016.

MATOS, J. G. *et al.* **Avaliação da qualidade de vídeo e VoIP em sistema LTE com diferentes algoritmos de escalonamento utilizando métricas de QoS**. v. 12, p. 13–16, 2012. Disponível em: <http://sbrrt.org.br/sbrrt2012/publicacoes/98273_1.pdf>. Acesso em: 20 set. 2016.

MAZZONI, V. S. **Análise Histórica e Funcional das Redes 4G LTE**. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014. Disponível em: <<http://monografias.nrc.ice.ufjf.br/tcc-web/downloadPdf?id=175>>. Acesso em: 10 out. 2016.

MELO, E. H. D. **Análise de tráfego de redes 3G/HSPA**. 78 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciência da Computação) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010. Disponível em: <<http://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/2399>>. Acesso em: 28 out. 2016.

MENDES, C. T. E. **Avaliação de Desempenho de Algoritmos de Escalonamento de Dados em Redes LTE**. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) — Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014. Disponível em: <<http://repositorio.ufla.br/handle/1/10713>>. Acesso em: 12 set. 2016.

NETKROM. **Time Division Duplex (TDD) vs Frequency Division Duplex (FDD) in Wireless Backhails**. Disponível em: <http://www.netkrom.com/legado/support/whitepapers/TDD_vs_FDD_in_wireless_backhaul_white_paper.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2016.

ORACLE. **Netbeans IDE**. 2017. Disponível em: <<https://netbeans.org/downloads/>>. Acesso em: 10 mai. 2017.

PAUL, R.; SHAH, K. V. **An objective comparison of second generation cellular systems-GSM, IS-136 and IS-95**. In: **Personal Wireless Communications, 1997 IEEE International Conference on**. IEEE, 1997. p. 510–514. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=655572>. Acesso em: 12 out. 2016.

PEREIRA, J. A. **Small Cell Deployment Evaluation on LTE**. 118 f. MSc. Thesis — Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2013. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395146227324/Thesis_JaimePereira.pdf>. Acesso em: 15 out. 2016.

SIVAKUMAR. D. **LTE Resource Guide**. 2016. Disponível em: <<https://3g4g5gprotocols.blogspot.com.br/2016/04/radio-interface-techniques-fdmatdmacdma.html>>. Acesso em: 01 nov. 2016.

SWETHA; MOHANKUMAR, N. M.; DEVARAJU, J. **Performance evaluation of round robin and proportional fair scheduling algorithms for constant bit rate**

traffic in lte. v. 4, p. 41–45, 2013. Disponível em:
<<http://www.ijcnwc.org/papers/vol3no12013/8vol3no1.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2016.

TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. **Redes de Computadores.** [S.l.]: PEARSON, 2011. ISBN 978-85-7605-924-0.