



CRISTIAN TIAGO ERAZO MENDES

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE
ALGORITMOS DE ESCALONAMENTO DE
DADOS EM REDES LTE**

LAVRAS – MG

2014

CRISTIAN TIAGO ERAZO MENDES

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ALGORITMOS DE
ESCALONAMENTO DE DADOS EM REDES LTE**

Monografia apresentada ao Colegiado do Curso de
Ciência da Computação, para a obtenção do título
de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador

Prof. Neumar Costa Malheiros

LAVRAS – MG

2014

CRISTIAN TIAGO ERAZO MENDES

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE
ALGORITMOS DE ESCALONAMENTO DE
DADOS EM REDE LTE**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação apresentado ao Colegiado do
Curso de Bacharelado em Ciência da
Computação, para obtenção do título de
Bacharel.

APROVADA em 28 de novembro de 2014.

Dr. Tales Heimfarth

Dr. Luiz Henrique Andrade Correia



Dr. Neumar Costa Malheiros (Orientador)

**LAVRAS-MG
Novembro/2014**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade por ter feito parte desta instituição importante. Agradeço também a minha família por ter me apoiado desde o início, em especial minha mãe e avó. E também aos meus amigos e ao meu orientador, Prof. Neumar Malheiros, pelos ensinamentos, atenção e apoio para que eu concluísse esse trabalho.

RESUMO

Nos últimos anos, o uso de dispositivos móveis se tornou uma das mais importantes ferramentas de comunicação. Por exemplo, os telefones celulares, que inicialmente eram utilizados apenas para transmissão de voz, com os avanços nas tecnologias de rede, passaram a oferecer novas funcionalidades como acesso à Internet e aplicações sofisticadas para videoconferência. Assim, aumentou-se drasticamente o número de usuários de dispositivos móveis. Este trabalho tem como finalidade analisar uma dessas tecnologias de redes sem fio para transmissão de dados, a LTE. Em particular, este trabalho apresenta uma avaliação de desempenho dos algoritmos de escalonamento de dados, em termos de sua eficiência ao distribuir os recursos disponíveis entre os usuários da rede.

Palavras-Chave: Redes Celulares; Algoritmos de Escalonamentos; Tecnologia LTE.

SUMÁRIO

1	Introdução	10
2	Arquiteturas de Redes Celulares	12
2.1	Redes de Voz	12
2.2	Redes de Voz e Dados	14
2.3	Evolução das Tecnologias de Transmissão de Dados	14
2.3.1	GPRS	15
2.3.2	EDGE	16
2.3.3	HSPA	16
2.3.4	LTE	17
2.4	Resumo Comparativo	19
3	Escalonamento em Redes LTE	20
3.1	FIFO	21
3.2	Proportional Fair	22
3.3	Round Robin	22
3.4	Throughput to Average	23
3.5	Priority Set	23
4	Metodologia	24
5	Avaliação de Desempenho	26
5.1	Avaliação da Vazão	26
5.1.1	Em Função do Número de Dispositivos	26
5.1.2	Em Função da Distância entre Dispositivos	29
5.2	Avaliação do PDR	32
5.2.1	Em Função do Número de Dispositivos	32
5.2.2	Em Função da Distância entre Dispositivos	35

6 Conclusão	38
A Script das Simulações	41

LISTA DE FIGURAS

2.1	Componentes da Arquitetura de rede 2G	13
2.2	Componentes da Arquitetura de rede 2,5G.	15
2.3	Componentes da Arquitetura de rede LTE	18
3.1	Alocação de recursos rede LTE. Fonte:(CAPOZZI <i>et al.</i> , 2013)	21
4.1	Script das simulações	24
5.1	Vazão Agregada com 10 Dispositivos.	27
5.2	Vazão Agregada com 15 Dispositivos.	27
5.3	Vazão Agregada com 25 Dispositivos.	28
5.4	Vazão Agregada com distância = 10 metros entre dispositivos.	30
5.5	Vazão Agregada com distância = 50 metros entre dispositivos.	30
5.6	Vazão Agregada com distância = 150 metros entre dispositivos.	31
5.7	PDR com 10 Dispositivos.	33
5.8	PDR com 15 Dispositivos.	33
5.9	PDR com 25 Dispositivos.	34
5.10	PDR com com distância = 10 metros entre dispositivos.	36
5.11	PDR com com distância = 50 metros entre dispositivos.	36
5.12	PDR com com distância = 150 metros entre dispositivos.	37

LISTA DE TABELAS

2.1	Comparação das tecnologia de transmissão de dados	19
3.1	Notação usada pelas métricas dos algoritmos	21

LISTA DE SIGLAS

AMPS	Advanced Mobile Phone System
BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station System
BTS	Base Transceiver Station
EDGE	Enhanced Data Rates For GSM Evolution
EPC	Evolved Packet Core
E-UTRAN	Evolved Universal Mobile Telecommunications System Terrestrial Radio Access Network
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FPDS	Frequency Domain Packet Scheduler
FIFO	First In First Out
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GPRS	General Packet Radio System
GSM	Global System for Mobile Communication
HSPA	High Speed Packet Access
ISP	Internet Service Provider
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
MSC	Mobile Switching System
NMT	Nordic Mobile Telephone
NTT	Nippon Telephone and Telegraph
PDR	Packet Delivery Ratio
PGW	Packet Data Network Gateway
PSTN	Public switched telephone network
RAN	Radio Access Network
RB	Resource Block
RTPC	Rede Pública de Telefonia Comutada
SGSN	Gateway GPRS Support Node
SGW	Serving Gateway
SIM	Subscriber Identity Mobile
TACS	Total Access Communications System
TDMA	Time Division Multiple Access
TDPS	Time Domain Packet Scheduler
TTI	Transmission Time Interval
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
3GPP	3rd Generation Partnership Project

1 INTRODUÇÃO

A telefonia móvel passou por grandes mudanças nos últimos anos, com o desenvolvimento de tecnologias de transmissão de dados, aumentando a qualidade e velocidade na comunicação. Os celulares já não são mais utilizados apenas para uma simples chamada, eles dispõem cada vez mais de novos recursos. Esses recursos aumentam a interatividade com o usuário, permitindo a transmissão de fotos, vídeos e músicas, a comunicação simultânea por vídeo e áudio, jogos interativos e outros. Segundo a ANATEL, o Brasil alcançou 265,7 milhões de linhas de acessos móveis em junho de 2013. A banda larga móvel totalizou 77,4 milhões de linhas, dos quais 174,1 mil são terminais 4G (ANATEL, 2013). Com essa importância adquirida pela comunicação via celulares, surge a cada dia avanços nos estudos sobre a transmissão de dados. Melhorias são necessárias nas infra estruturas das redes para suportar as novas tecnologias, como na disposição dos componentes físicos e no gerenciamento do tráfego de dados.

As tecnologias celulares são classificadas por gerações, a primeira, identificada como G1, tinha a simples função de transmissão de voz. A 2G, segunda geração, inicialmente permitia só o tráfego de voz, depois passou a permitir também envio de dados. A terceira geração já possuía a capacidade de transmitir dados, sua evolução ocorreu no aumento da velocidade da banda de transmissão. O grupo 3rd Generation Partnership Project (3GPP) é responsável por padronizar os recursos necessários para transição para a 4G.

No Brasil, a tecnologia 4G vai funcionar na frequência de 2,5 GHz, a mesma usada em diversos países da Europa, Ásia e do Oriente Médio. Em alguns países são usadas outras faixas, como 2,1GHz, 1,8 GHz e a de 700 MHz. Estados Unidos e Argentina, por exemplo, usam a faixa de 700 MHz. O que pode ser um problema, pois muitos aparelhos que funcionam em tecnologia 4G no exterior podem não funcionar no Brasil, pelo fato dos fabricantes optarem por escolher faixas

de frequência diferentes em relação a tecnologia utilizada no Brasil (ANATEL, 2014).

A principal tecnologia 4G é a Long Term Evolution (LTE). Essa tecnologia traz grandes expectativas na sua utilização, com uma evolução significativa em relação à tecnologia anterior. A transmissão de dados passa a ter destaque, por suportar uma velocidade de banda larga bem superior em relação a 3G.

A implantação da tecnologia LTE ainda representa grandes desafios. Uma das principais dificuldades consiste em determinar qual mecanismo de escalonamento possui melhor desempenho em cenários de redes específicos. Os algoritmos de escalonamento de pacotes gerenciam a fila de pedidos dos serviços, além decidir a ordem do fluxo das aplicações (MATOS *et al.*, 2012).

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre o desempenho dos principais algoritmos de escalonamento em redes LTE. Alguns objetivos específicos também são definidos, como:

- Analisar os principais elementos da arquitetura de redes celulares, como topologia, equipamentos de comutação e protocolos;
- Analisar as tecnologias de transmissão de dados em redes celulares;
- Analisar os principais algoritmos de escalonamento em redes LTE;
- Definir as principais vantagens e limitações dos algoritmos de escalonamento e tentar propor soluções para aprimorá-los;

A estrutura do trabalho está organizada da seguinte maneira. O Capítulo 2 descreve conceitos, definições e explicações sobre assuntos relacionados a arquitetura de redes celulares e tecnologias de transmissão de dados. O Capítulo 3 apresenta um estudo dos principais algoritmos de escalonamento que são usados em redes LTE. O Capítulo 4 mostra uma avaliação de desempenho dos algoritmos estudados. Por fim, o Capítulo 5 apresenta a conclusão e descreve trabalhos futuros.

2 ARQUITETURAS DE REDES CELULARES

Neste capítulo, serão descritos a arquitetura das tecnologias celulares, as mudanças que foram implantadas durante o desenvolvimento das primeiras redes até as atuais e uma evolução das tecnologias de transmissão de dados, mostrando características de cada uma e as principais diferenças entre elas.

2.1 Redes de Voz

Os primeiros aparelhos celulares, considerados da primeira geração (1G), eram sistemas *Frequency Division Multiple Access* (FDMA) analógicos e suas funções eram basicamente a comunicação por voz. Sua primeira utilização foi por volta dos anos 80. Algumas organizações desenvolveram no mesmo período, sistemas semelhantes, *Nippon Telephone and Telegraph* (NTT) no Japão, *Nordic Mobile Telephone* (NMT) e *Total Access Communications System* (TACS) na Europa e *Advanced Mobile Phone System* (AMPS) nos Estados Unidos (CHANDRAN; VALENTI, 2001).

Como nos anos 80 houve diversos sistemas de telefonia celular diferentes, os europeus perceberam que havia a necessidade de uma padronização. Na geração seguinte, 2G, a tecnologia que passou a ser adota foi a *Global System for Mobile Communication*(GSM) que inicialmente significava *Group Special Mobile*. A tecnologia GSM se consolidou nos anos 90. Sua implantação foi de grande sucesso devido às novidades que possuía por exemplo, mudança de sistemas analógicos para sistemas digitais, *roaming*, que facilita ao usuário fazer chamadas fora de sua área de acesso onde não é assinante, aumentando a mobilidade e utilização do chip SIM (*Subscriber Identity Module*), utilizado para identificação de cada usuário (CHANDRAN; VALENTI, 2001). Inicialmente a tecnologia GSM, suportava somente voz, depois foi estendida para suportar dados.

A área de cobertura de uma rede celular é constituída de células como mostrado na Figura 2.1. As células são porções de uma região geográfica. Cada célula precisa ter uma *Base Transceiver Station* (BTS), que faz a comunicação com os dispositivos móveis, transmitindo e recebendo sinais dentro de cada célula. A qualidade desta comunicação depende de vários fatores, como altura das antenas nas torres, a potência dos dispositivos e antenas, e a existência de obstáculos, como edifícios e monumentos altos (KUROSE; ROSS, 2010).

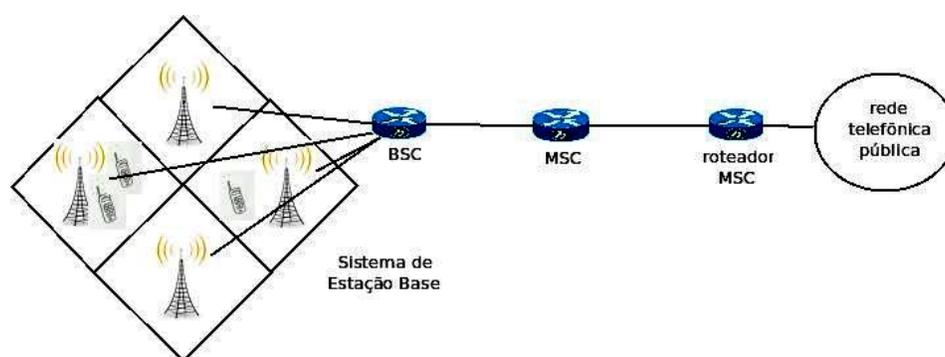


Figura 2.1: Componentes da Arquitetura de rede 2G

O padrão GSM utiliza nos sistemas celulares a composição FDMA/TDMA. No método de multiplexação por frequência, *Frequency Division Multiple Access* (FDMA), o canal é dividido em bandas de frequência entre as conexões estabelecidas durante as ligações. No método *Time Division Multiple Access* (TDMA), o tempo é dividido em intervalos de tempo (*slots*). Quando estabelece conexão cada *slot* é de uso exclusivo e fica disponível para transmitir os dados. Então com essa combinação FDMA/TDMA, o sistema pode realizar um número total de Frequências x Tempo, chamadas simultâneas (KUROSE; ROSS, 2010).

O *Base Station Controller* (BSC), tem a função de fazer o gerenciamento entre os dispositivos móveis e os BTS, alocando os canais de rádio da BTS a dispositivos móveis, realizar *paging* e transferências de usuários móveis. Um controlador poderá prestar serviços a várias estações Base. A rede criada pelo BSC e BTS forma o *Base Station System* (BSS).

A *Mobile Switching System* (MSC) interpreta a autorização do usuário, para determinar se o dispositivo permitiu ou não a conexão com a rede celular, faz também estabelecimento e interrupção de chamadas, e transferências. Uma MSC pode estar ligado a até 5 BSC. A rede provedor celular tem o roteador MSC para fazer conexão a rede telefônica pública.

2.2 Redes de Voz e Dados

Até a tecnologia da segunda geração, a principal preocupação era a transmissão de voz com qualidade. A partir do avanço da utilização da Internet, houve o interesse de expandir os meios de acesso a transmissão de dados. Essas duas funções, tráfego de voz e de dados, caracterizam as redes da geração 2,5(2,5G) (KUROSE; ROSS, 2010).

Com a tecnologia 2G, a maneira encontrada para fazer conexão com a Internet, foi por meio da conexão de telefonia celular com discagem para um *Internet Service Provider* (ISP). A desvantagem foi baixas taxas de transmissão, que possuíam médias com dezenas de kbps. A Figura 2.2 ilustra a arquitetura de uma rede celular 2,5G. Analisando essa figura percebe-se que novos elementos foram incorporados, o *Gateway GPRS Support Node* (GGSN), que faz a interconexão com outras redes, como Internet ou redes privadas, e o *Gateway GPRS Support Node* (SGSN), que localiza os dispositivos móveis e faz o roteamento dos datagramas IP entre BSC e a Internet. Foram introduzidos novos elementos, mas a arquitetura de transmissão de voz continua inalterada (KUROSE; ROSS, 2010).

2.3 Evolução das Tecnologias de Transmissão de Dados

Para melhorar a taxa de transmissão de dados, algumas tecnologias foram integradas à geração 2,5G. No acesso via rádio foi introduzido o *General Packet Radio System* (GPRS), que permite ao usuário envio de pacotes de dados de forma dinâ-

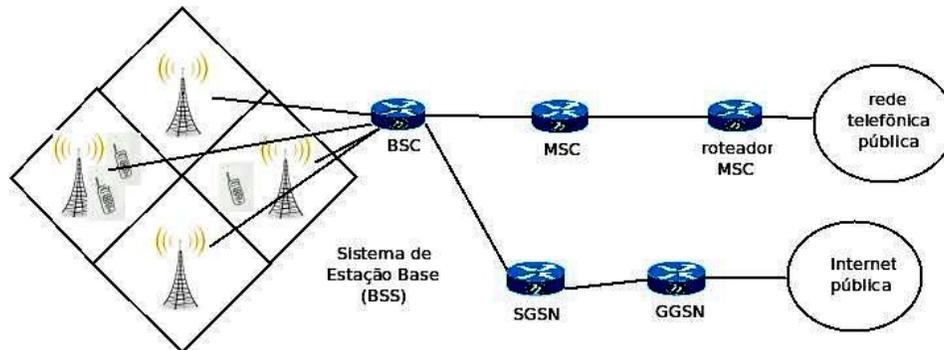


Figura 2.2: Componentes da Arquitetura de rede 2,5G.

mica, sem a necessidade de manter uma conexão dedicada apenas para envio de dados. Depois foi introduzido outra tecnologia, *Enhanced Data Rates For GSM Evolution* (EDGE), que aumentou a taxa de transmissão da GPRS.

Para suportar a tecnologia 3G, um novo padrão foi estabelecido, o *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS), sendo uma evolução do GSM. A arquitetura do UMTS, tem como base a arquitetura de redes do GSM, utiliza FD-MA/TDMA, exigindo a utilização de uma rede de dados separados da rede BSS, como pode ser visto na figura 2.2. O serviço de dados utilizado é o HSDPA/H-SUPA (pacote de acesso de alta velocidade de Downlink/Uplink), sendo que as médias de taxa de transmissão dados podem chegar até 14Mbps.

2.3.1 GPRS

A tecnologia *General Packet Radio System* (GPRS), foi padronizado pela ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*, para melhorar a transmissão de dados na rede GSM. Diferente das tecnologias anteriores, em que a transferência de dados era feita por comutação de circuitos, nesse sistema utiliza transmissão de dados por pacotes, com suporte ao protocolo IP e X.25 com utilização de recursos de rádio (BETTSTETTER; VOGEL; EBERSPACHER, 1999).

Essa tecnologia proporcionou um maior número de usuários conectados a rede, já que utilizando a comutação de pacotes, o canal só é ocupado quando está

enviando ou recebendo dados, ficando livre para ser compartilhado pelo restante dos usuários (DILLENBURG, 2012).

A sua velocidade de Downlink chega a 43 kbps, e a velocidade de uplink pode chegar a 21 kbps (GURTOV *et al.*, 2002).

2.3.2 EDGE

O EDGE foi desenvolvido pelo *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) na Europa, faz parte da transição da geração 3G. Que foi desenvolvido para aumentar as taxas de transmissão de dados. Apesar de ser utilizado na tecnologia GSM, utiliza *Time Division Multiple Access* (TDMA), uma tecnologia que funciona fazendo com que um canal de comunicação seja dividido em intervalos de tempo alternados (FURUSKAR *et al.*, 1999).

É considerado uma evolução da tecnologia GPRS, com taxa de transmissão maiores, em média a 384 kbps . Os seus elementos de rede, são compatíveis com a tecnologia GPRS, facilitando a utilização de redes já existentes (FURUSKAR *et al.*, 1999) (SALVADOR; MEDEIROS; SILVA, 2008).

2.3.3 HSPA

A geração 3G utiliza o padrão UMTS, que oferece vários serviços, incluindo aos serviços de telefonia comutada Rede Pública de Telefonia Comutada (RTPC) ou do inglês *Public switched telephone network* (PSTN), redes de serviços de dados com endereços IP, como a Internet e aplicações multimídia. Em sua interface aérea, rede que envia pacotes de dados, os serviços são nomeados como Uplink e Downlink (MELO, 2010).

A tecnologia HSPA, faz parte da terceira geração da telefonia celular. Caracteriza as melhorias na interface de radio do UMTS. O HSPA se refere as melhorias nas redes de acesso, sem modificações de elementos na rede de núcleo. Ela faz atualizações em softwares e nos elementos que realizam as trocas de dados,

devido ao aumento do número de dados trafegados. A rede HSPA oferece taxas de até 14 Mbps de downlink e 5,76 Mbps para uplink (MELO, 2010).

2.3.4 LTE

Com o aumento cada vez maior do número de usuários de dispositivos móveis, a tecnologia de redes celulares, vêm mantendo avanços contínuos ao longo dos anos. Para suportar o número de usuários conectados ao mesmo tempo, e aumentado a qualidade das transmissões de dados, com taxas de banda mais elevadas com baixo custo.

A tecnologia *Long Term Evolution* (LTE), padronizado pela 3GPP, é uma tecnologia da quarta geração de telefonia celular, tendo como características o tráfego de dados com maior velocidade e maior capacidade da largura de banda. Sua arquitetura é compatível com as anteriores, tanto as desenvolvidas pela 3GPP como as demais (NOHRBORG, 2013) (PIRO *et al.*, 2010).

Essa tecnologia utiliza a técnica *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO), em que os dados percorrem diferentes caminhos, com mesmas frequências e ao mesmo tempo. Alcançando altas taxas de transferências. Sua velocidades podem chegar a 170 Mbps de Uplink e 300 Mbps de Downlink (NOHRBORG, 2013).

O LTE é considera uma evolução do sistema 3G (CAPOZZI *et al.*, 2013). O sistema LTE foi projetado baseado no padrão IP, permitindo a comunicação com outras tecnologias que utilizam do mesmo padrão (MATOS *et al.*, 2012). Utiliza a tecnologia *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access* (OFDMA) que é sistema de acesso múltiplo, baseado no *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* OFDM, e que os dados dos usuarios são transmitidos em diferentes subportadoras permitindo a transmissão do tráfego individual simultâneo (BEH; DOUFEXI; ARMOUR, 2007).

Como pode ser observado na Figura 2.3, a arquitetura é composta por duas redes, *Evolved Packet Core Network* (EPC) e *Radio Access Network* repre-

sentada pelas *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN) (CAPOZZI *et al.*, 2013).

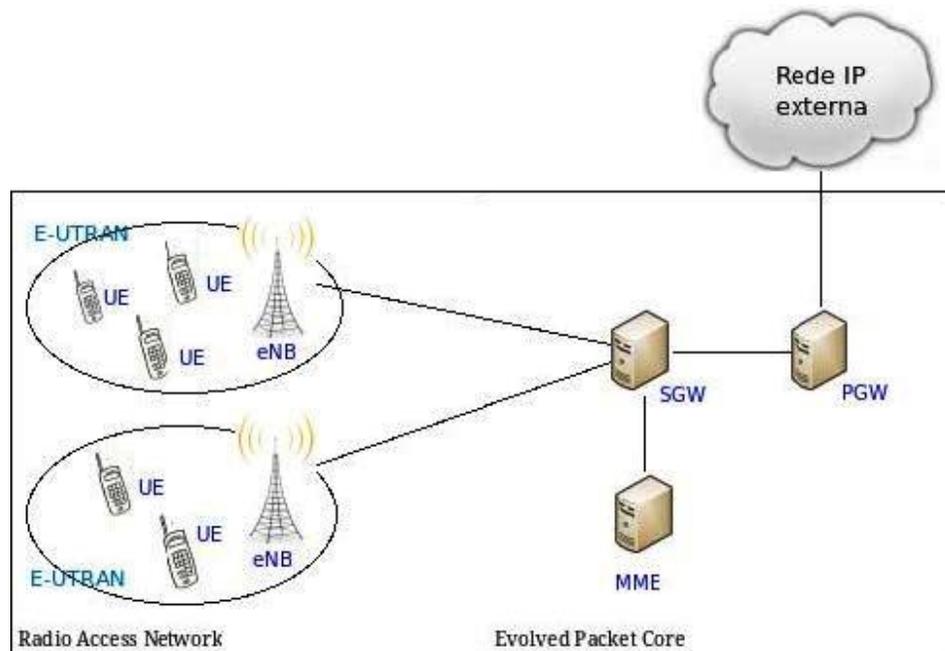


Figura 2.3: Componentes da Arquitetura de rede LTE

A rede Evolved Packet Core, é composta por Mobility Management Entity (MME), Serving Gateway (SGW) e Packet Data Network Gateway (PGW). O MME é responsável pela solicitação e liberação dos recursos no estabelecimento de conexões dos UE, dispositivos dos usuários, na rede E-UTRAN. E faz o rastreamento de cada UE após a conexão, informando a localidade e se está ativo.

SGW é responsável pelo estabelecimento e gerenciamento de rotas, e a transmissão dos dados entre os usuários nas redes LTE. O PGW tem como função a conexão de redes LTE, e redes de pacotes de dados externas.

A E-UTRAN é composta por UEs e eNodeB. O eNodeB é uma estação rádio base, responsável por gerenciar os recursos de rádio e os métodos de controle sobre as interfaces de rádio. Pode estar distribuído em toda a área de cobertura da rede, são interligados pela antena de rádio.

2.4 Resumo Comparativo

Após analisar a evolução das tecnologia de transmissão de dados, foi feita um resumo comparando alguns aspectos dessas tecnologias, como os padrões de telefonia celular que elas utilizam, quais gerações de telefonia celular elas pertencem, quais técnicas de divisão de canal e taxas de transmissão de dados.

Analisando o resumo comparativo apresentado na Tabela 2.1, percebe-se que as tecnologias GPRS e EDGE possuem características semelhantes, utilizando sistema GSM e TDMA/FDMA para divisão de canal. A diferença se encontra na taxa de entrega de dados em que o sistema EDGE é maior.

Outra observação é que o sistema HSPA e LTE utilizam o mesmo sistema UMTS, mas diferem na técnica de divisão de canal, HSPA utiliza a técnica CDMA e LTE utiliza OFDMA.

E por último a diferença considerável da taxa de transmissão de dados do sistema LTE em relação as tecnologias anteriores.

Tabela 2.1: Comparação das tecnologia de transmissão de dados

Tecnologias	Geração	Sistema Telefonia Celular	Tecnicas de Divisão de canal	Taxa de fluxo
GPRS	2.5G	GSM	TDMA/FDMA	43 Kbps
EDGE	2.75G	GSM	TDMA/FDMA	384 kbps
HSPA	3G	UMTS	CDMA	14 Mbps
LTE	4G	UMTS	OFDMA	300 Mbps

3 ESCALONAMENTO EM REDES LTE

Neste capítulo, serão descritos alguns dos principais algoritmos de escalonamento de pacotes para transmissão de dados em redes LTE. Cada um dos algoritmos define uma estratégia para alocação dos recursos na rede de comunicação, considerando requisitos de Qualidade de Serviços (QoS), a fim de proporcionar garantias de qualidade para os fluxos de dados (CAPOZZI *et al.*, 2013).

A alocação de recursos para cada dispositivo é geralmente baseada na comparação das métricas por blocos de recursos (RB), sendo que o k -ésimo RB é alocado para o j -ésimo usuário, se o valor do $m_{j,k}$ (depende da métrica do algoritmo de escalonamento) é o maior, ou seja, satisfaz a equação 3.1.

$$m_{j,k} = \max_i \{m_{i,k}\} \quad (3.1)$$

As métricas podem ser analisadas como sendo a prioridade de transmissão de cada usuário em um RB específico. Com base no requisito do seu desempenho, o cálculo é avaliado a partir de informações relacionadas a cada fluxo e útil para conduzir a decisão de alocação (CAPOZZI *et al.*, 2013).

Os algoritmos de escalonamento atua em cada intervalo de tempo de transmissão (TTI), para alocar os blocos de recursos para os dispositivos segundo as métricas de prioridades específicas (ZHOU; BALDO; MIOZZO, 2013).

A Figura 3.1 exemplifica como é a alocação de recursos na rede LTE, feita pelos algoritmos de escalonamento. O RB (Bloco de Recursos) é formado entre um sub canal no domínio da frequência e um TTI domínio do tempo, sendo a menor unidade de recursos (CAPOZZI *et al.*, 2013).

Nas seções a seguir, serão explicados cinco algoritmos de escalonamento: First In First Out (FIFO), Proportional Fair, Round Robin, Throughput to Average, Priority Set. A Tabela 3.1, mostra o significado de cada expressão utilizada para o estudo sobre as métricas de escalonamento.

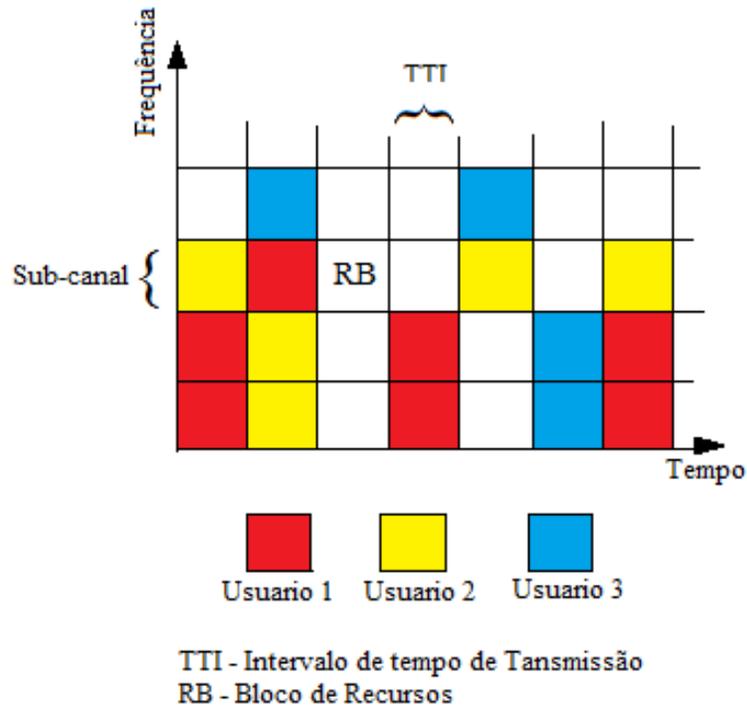


Figura 3.1: Alocação de recursos rede LTE. Fonte:(CAPOZZI *et al.*, 2013)

Tabela 3.1: Notação usada pelas métricas dos algoritmos

Expressão	Significado
$d_k^i(t)$	taxa de dados do i-esimo usuario no tempo t e k-esimo bloco de recursos
$d^i(t)$	taxa de dados do i-esimo usuario no tempo t
$R^i(t)$	Vazão média anterior do i-ésimo usuário no tempo t

3.1 FIFO

O algoritmo de escalonamento First In First Out (FIFO) é um dos casos mais simples utilizados para alocação de recursos para transmissão de dados, a sua métrica funciona basicamente de acordo com a ordem em que as solicitações foram feitas, ou seja, os usuários são atendidos na ordem de chegada de cada solicitação dos recursos.

A equação 3.2, reflete isso, da seguinte forma, na solicitação do i -ésimo usuário, na k -ésima RB, onde t tempo atual e T_i é o tempo em que foi feito pedido.

$$m_{i,k}^{FIFO} = t - T_i \quad (3.2)$$

3.2 Proportional Fair

O algoritmo Proportional Fair (SHREEDHAR; VARGHESE, 1995) escalona os dados de forma justa entre os usuários da rede, com probabilidade de atendimento semelhante, independente das condições do canal de cada usuário. Ele utiliza um esquema no qual o usuário escolhido pelo escalonador de pacotes é o que possui maior razão entre a taxa de dados instantânea e a taxa média de dados transmitidos.

A equação 3.3 mostra a razão determinada pelo escalonador PF de cada usuário, a $d_k^i(t)$ é a taxa de dados instantânea, e $R^i(t-1)$, é a taxa média de dados transmitidos (MATOS *et al.*, 2012).

$$m_{i,k}^{PF} = \frac{d_k^i(t)}{R^i(t-1)} \quad (3.3)$$

3.3 Round Robin

No escalonamento Round Robin, os recursos de tempo são divididos igualmente entre os usuários que fizeram a solicitação, a métrica é semelhante ao do escalonamento FIFO, a diferença está no T_i , que é o último acesso ao canal de transmissão do usuário i .

A equidade relacionada ao Round Robin se refere ao tempo disponibilizado. Mas se comparada a taxa de transferência de cada usuário, que pode ser diferentes, e as adversidades dos canais que se encontram em sistemas sem fio, as porções dos recursos serão diferentes.

$$m_{i,k}^{RR} = t - T_i \quad (3.4)$$

3.4 Throughput to Average

O algoritmo Throughput to Average tenta dividir os recursos disponíveis entre todos os usuários, conforme a métrica apresentada na Equação 3.5, onde $d_k^i(t)$ é a taxa de dados instantânea, do i -ésimo usuário no tempo t e k -ésimo bloco de recursos, e $d^i(t)$ é a taxa do i -ésimo usuário em cada TTI.

$$m_{i,k}^{TTA} = \frac{d_k^i(t)}{d^i(t)} \quad (3.5)$$

3.5 Priority Set

O escalonamento Priority Set atua no domínio de tempo, escolhendo os usuários que possuem maior prioridade. A escolha é feita de acordo com o fluxo de transferência de dados, ou seja, os usuários com fluxo abaixo do esperado em relação a sua taxa de bits alvo, são escalonados com maior prioridade, para satisfazer os requisitos do QoS. O restante dos usuários com menor prioridade ficam em segundo plano.

Após a escolha feita pelo Time Domain Packet Scheduler(TDPS), dos usuários com maior prioridade, o FDPS (Frequency Domain Packet Scheduler) distribui os recursos de acordo com uma métrica de escalonamento, como o Proporcional Fair.

No próximo capítulo, será mostrado como foram formadas as topologias de rede com os componentes para a avaliação dos algoritmos em estudo.

4 METODOLOGIA

A proposta deste trabalho é a comparação de desempenhos de algoritmos de escalonamento em redes LTE. A avaliação de desempenho será feita por meio de simulações, representados no Apêndice A.

As simulações serão realizadas no simulador Network Simulator (NS-3), por implementar os algoritmos tradicionais de escalonamento nas as redes LTE, por ser bem conceituado e amplamente utilizado trabalhos acadêmicos. Os algoritmos avaliados serão Proportional Fair, Round Robin, Priority Set e Throughput to Average.

As topologias construídas estão representadas na Figura 4.1, em que os dispositivos estão estáticos, dispostos uma variação de distância d entre eles. Todos os usuarios conectados a rede possuem a mesma demanda, sendo a velocidade de envio 0,8 Mbps. O intervalo de confiança foi calculado com um nível de confiança de 68%. O script simula a entrega de dados dos UEs aos remote host, utilizando os algoritmos para determinar as prioridades de escalonamento.

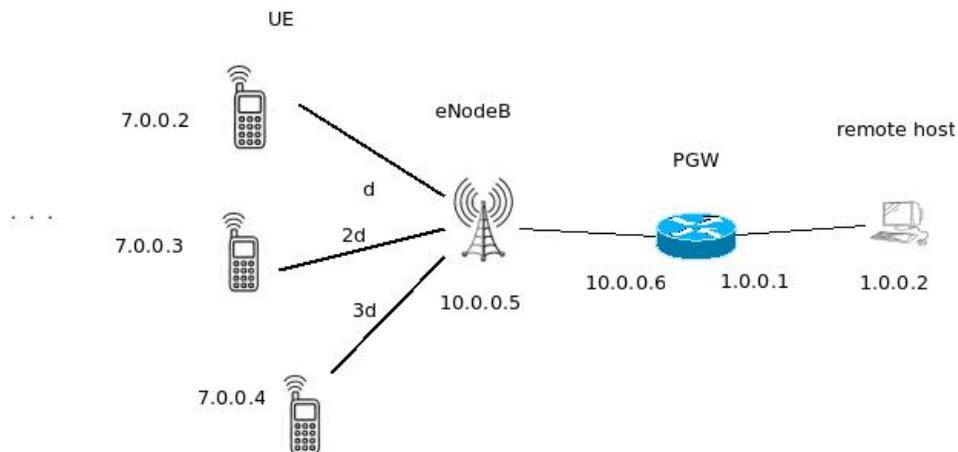


Figura 4.1: Script das simulações

As simulações serão feitas em vários cenários de redes, com 10 repetições e tempo de 5 segundos cada. As variações para avaliar o desempenho serão feitas em relação ao:

- Densidade da rede com 10, 15 e 25 dispositivos móveis;
- Distância entre os nós com 10, 50 e 150 metros.

Para determinar sobre quais aspectos os algoritmos de escalonamento podem ser comparados e avaliados, serão utilizados as seguintes métricas:

- Vazão média (throughput), sendo a soma do fluxo total da rede dividido pelo tempo de simulação, e será medido por Mbps;
- Taxa de entrega de pacotes (packet delivery ratio).

5 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados de quatro experimentos de avaliação de desempenho nos quais são medidas a vazão média e taxa de entrega de pacotes em função do número de dispositivos e da distância entre eles.

5.1 Avaliação da Vazão

Nesta seção será avaliado a vazão em função do número de dispositivos móveis e da distância entre os dispositivos.

5.1.1 Em Função do Número de Dispositivos

Os gráficos apresentados nas Figuras 5.1, 5.2, 5.3 mostram a vazão média para cenários com 10, 15 e 25 dispositivos móveis, respectivamente. Em cada cenário, foram consideradas diferentes distâncias entre os nós na topologia da rede (10m, 50m, 150m). Analisando os resultados, pode-se concluir que:

- Em geral, com o mesmo número de dispositivos, a medida que a distância aumenta a vazão agregada diminui para todos os algoritmos. No entanto, há duas exceções: 1) nas comparações das redes de 10 e 50 metros com 10 dispositivos, que houve uma leve melhora para todos algoritmos, menos Priority Set. 2) nas redes com 15 dispositivos móveis em que o algoritmo Throughput to Average praticamente possui a mesma vazão com 10 e 50 metros;
- O Algoritmo Throughput to Average, nas topologias com 15 e 25 Dispositivos e distância 10 e 50 metros, se mostrou inferior aos demais algoritmos, com uma menor vazão.

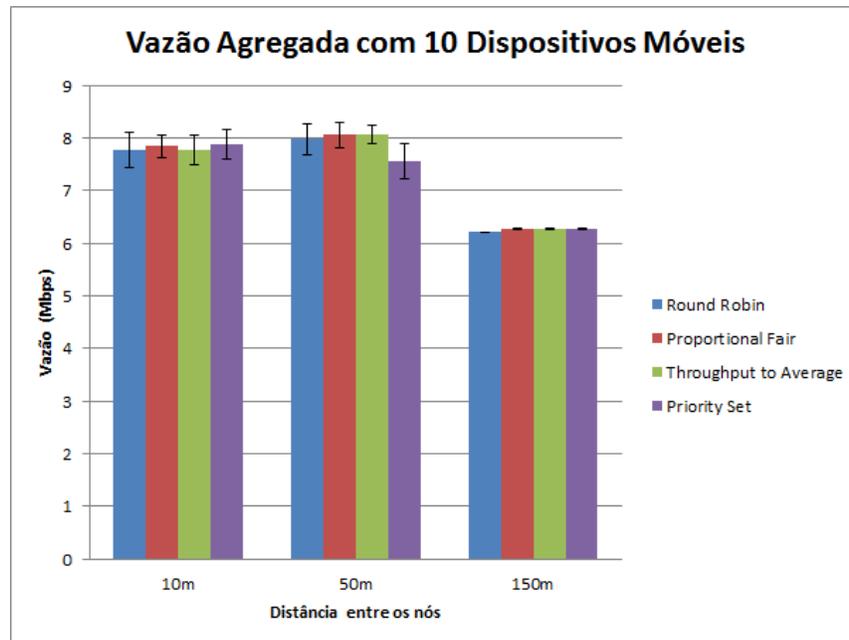


Figura 5.1: Vazão Agregada com 10 Dispositivos.

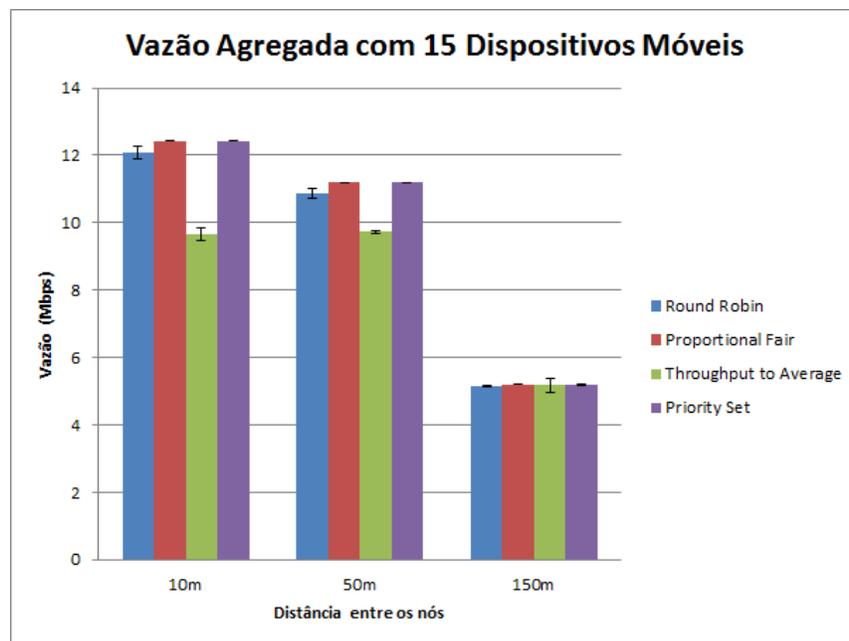


Figura 5.2: Vazão Agregada com 15 Dispositivos.

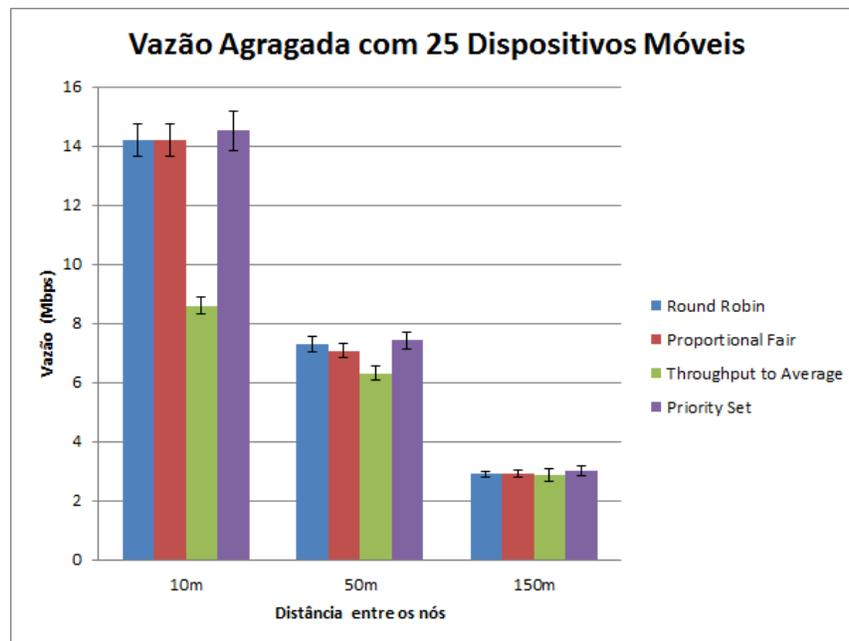


Figura 5.3: Vazão Agregada com 25 Dispositivos.

5.1.2 Em Função da Distância entre Dispositivos

Os gráficos apresentados nas Figuras 5.4, 5.5, 5.6 mostram a vazão média para cenários com 10, 50 e 150 metros entre os dispositivos móveis, respectivamente. Em cada cenário, foram consideradas diferentes números de nós na topologia da rede (10, 15, 25) dispositivos. Analisando os resultados, pode-se concluir que:

- Nas topologias com distância de 10 metros, em geral os algoritmos aumentam proporcionalmente a vazão agregada, a medida que aumenta o número de dispositivos na rede. Apenas o algoritmo Throughput to Average cresce em uma proporção inferior aos demais, chegando a ter uma vazão menor comparada a vazão nos cenários com 15 e 25 dispositivos;
- Nas topologias com distância de 50 metros entre os nós, as maiores vazões agregadas aconteceram com topologias de 15 dispositivos;
- Nas redes com 50 metros entre os nós, a vazão nos cenários com 10 dispositivos tiveram valores próximos, apenas o algoritmo Priority Set teve uma pequena diferença, com menor vazão. Enquanto o algoritmo Throughput to Average teve uma maior diferença, com menor vazão, comparado aos outros cenários com 15 e 25 dispositivos;
- Em relação as redes com 150 metros de distâncias entre os dispositivos, observa-se que quando comparados os algoritmos com mesmo número de nós, quase não houve variação da vazão. Mas a vazão agregada de cada algoritmo diminui a medida que aumenta o número de nós.

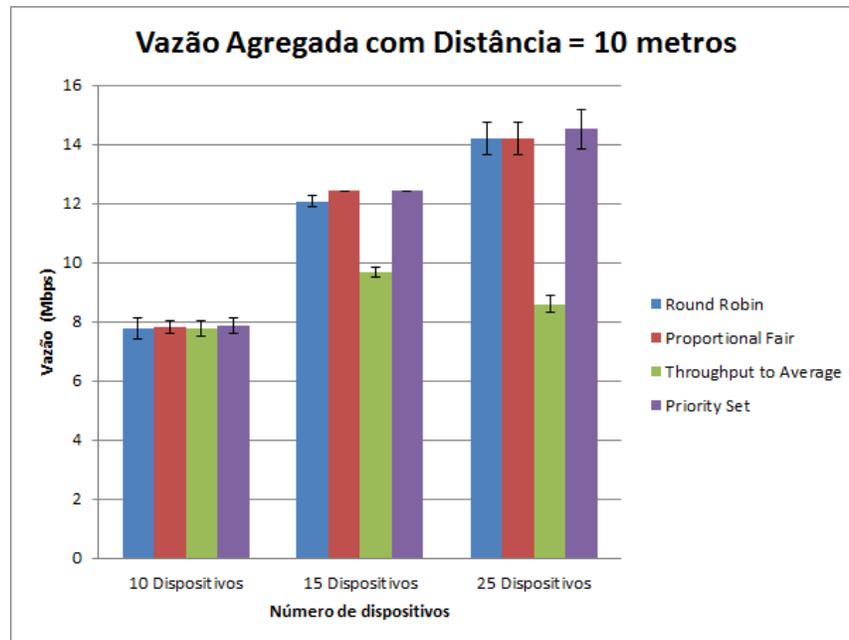


Figura 5.4: Vazão Agregada com distância = 10 metros entre dispositivos.

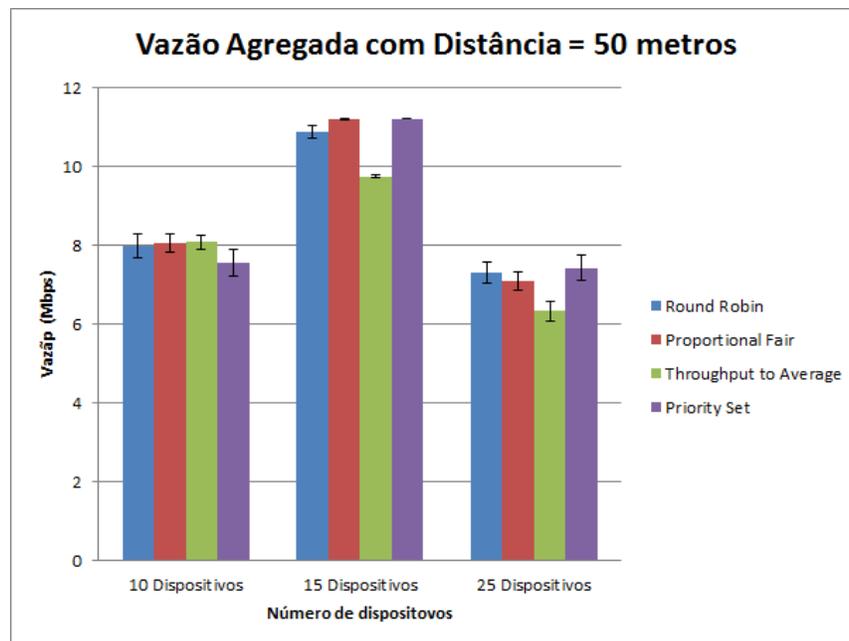


Figura 5.5: Vazão Agregada com distância = 50 metros entre dispositivos.

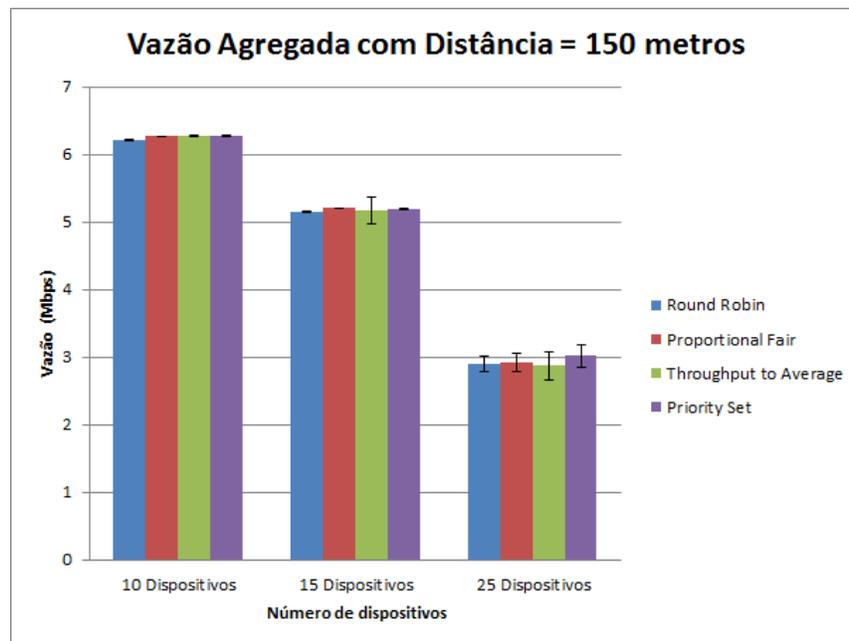


Figura 5.6: Vazão Agregada com distância = 150 metros entre dispositivos.

5.2 Avaliação do PDR

Nesta seção será avaliado a taxa de entrega de pacotes (PDR) em função do número de dispositivos móveis e da distância entre os dispositivos.

5.2.1 Em Função do Número de Dispositivos

Os gráficos apresentados nas Figuras 5.7, 5.8, 5.9 mostram as taxas de envio de pacotes para cenários com 10, 15 e 25 dispositivos móveis, respectivamente. Em cada cenário, foram consideradas diferentes distâncias entre os nós na topologia da rede (10m, 50m, 150m). Analisando os resultados, pode-se concluir que:

- A taxa de entrega de pacotes diminui a medida que aumenta o número de dispositivos, ocorre apenas uma exceção, quando aumenta o número de dispositivo de 10 para 15 nós, com distância de 50 metros;
- Nas topologias com 10 dispositivos e 50 metros entre eles, o PDR foi semelhante entre os algoritmos, apenas o algoritmo Priority Set teve apenas uma pequena variação para menos;
- Nas redes com 10 dispositivos e 150 metros, houve uma perda considerável de pacotes em comparação com as topologias de 10 e 50 metros;
- A taxa de envio de pacotes do algoritmo Throughput to Average foi inferior ao restante dos algoritmos, nas topologias com 15 e 25 dispositivos, com variações nas distâncias 10 e 50 metros.

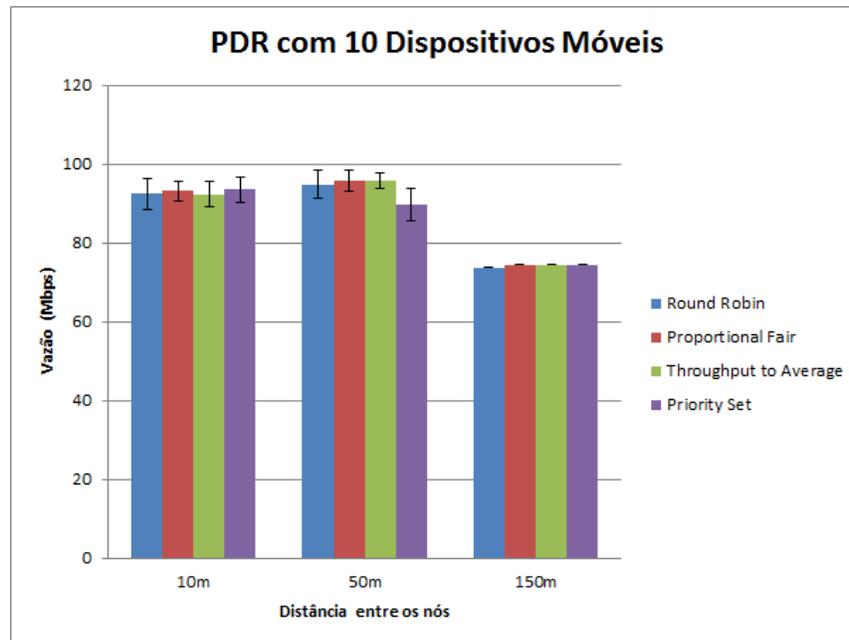


Figura 5.7: PDR com 10 Dispositivos.

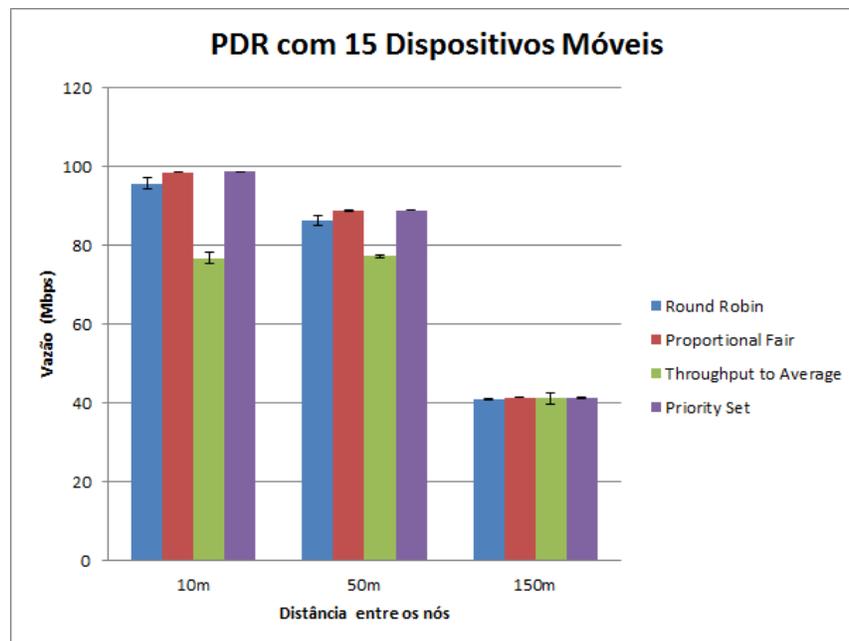


Figura 5.8: PDR com 15 Dispositivos.

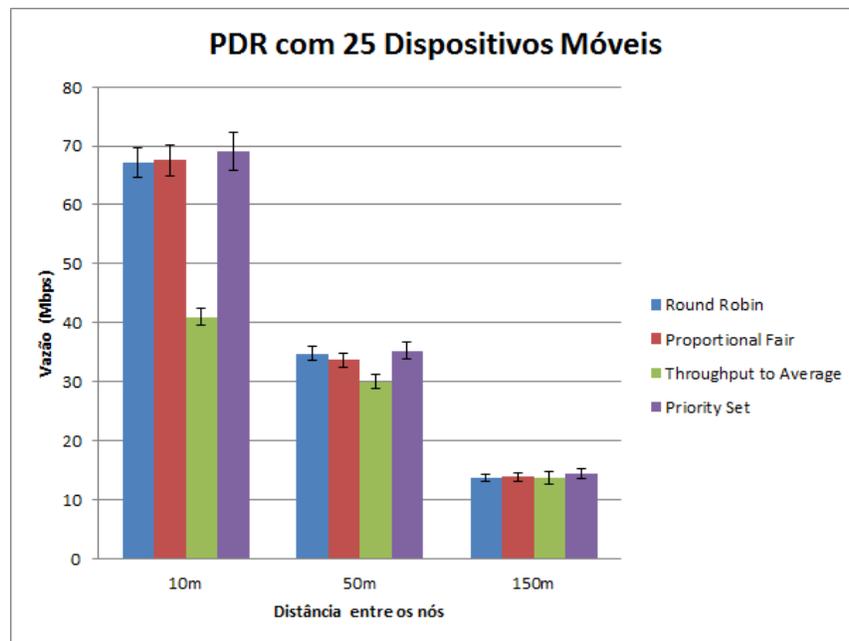


Figura 5.9: PDR com 25 Dispositivos.

5.2.2 Em Função da Distância entre Dispositivos

Os gráficos apresentados nas Figuras 5.10, 5.11, 5.12 mostram a taxa de envio de pacotes para cenários com 10, 50 e 150 metros entre os dispositivos móveis, respectivamente. Em cada cenário, foram consideradas diferentes números de nós na topologia da rede (10, 15, 25) dispositivos. Analisando os resultados, pode-se concluir que:

- Em geral, a medida que aumenta o número de dispositivos móveis, diminui a taxa de entrega de pacotes, apenas uma exceção ocorre no caso do cenário com uma topologia de 10 metros entre os nós, e variação de 10 para 15 dispositivos, há uma pequena melhora para todos os algoritmos, menos o Throughput to Average;
- Em uma análise da rede com distância de 10 metros entre os dispositivos, o algoritmo Throughput to Average possui um PDR inferior ao restante dos algoritmos, tanto na rede com 15 dispositivos quanto na rede com 25 dispositivos;
- O PDR calculado com distância igual 150 metros, foi o que mais demonstrou homogeneidade entre os algoritmos, quando comparados com uma mesma quantidade de nós.

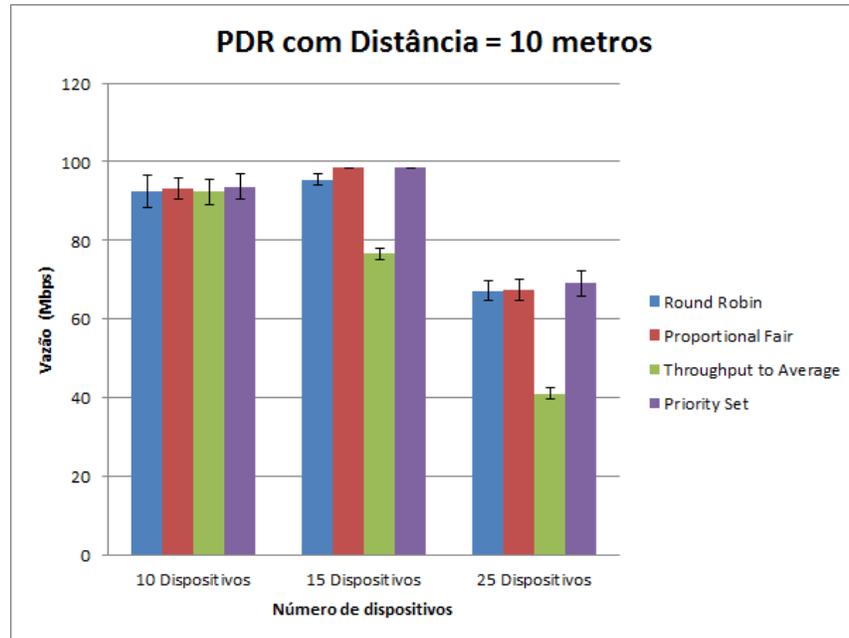


Figura 5.10: PDR com com distância = 10 metros entre dispositivos.

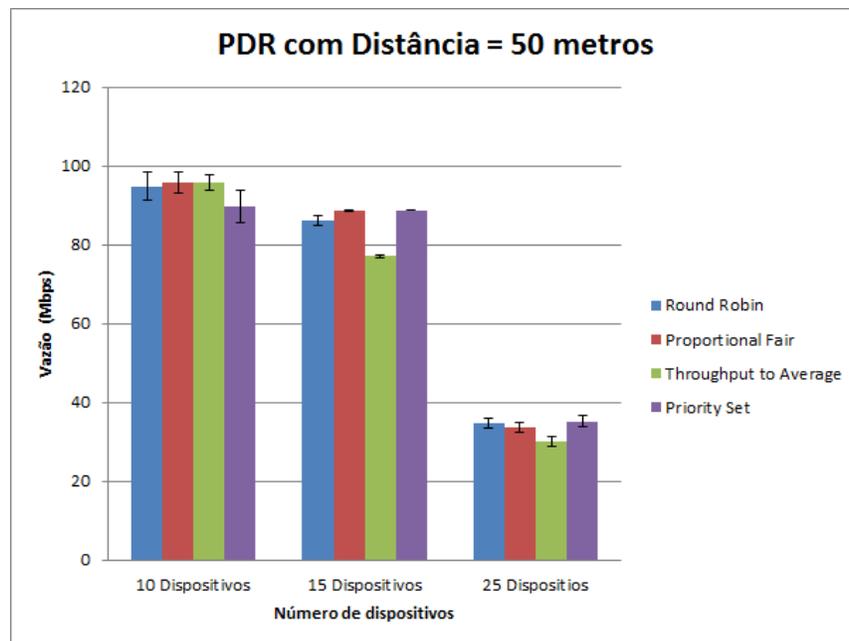


Figura 5.11: PDR com com distância = 50 metros entre dispositivos.

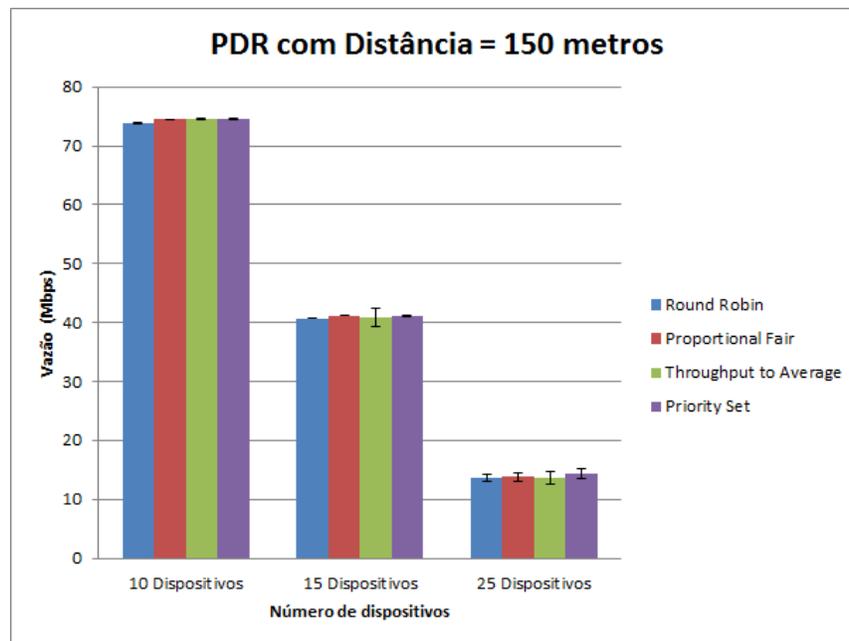


Figura 5.12: PDR com com distância = 150 metros entre dispositivos.

6 CONCLUSÃO

Esse trabalho apresentou uma avaliação de desempenho dos principais algoritmos de escalonamento de dados em redes celulares com tecnologia LTE. É de grande importância esse estudo, já que a transmissão de dados se torna cada vez mais significativa entre os dispositivos móveis, com o número crescente de usuários. Com essa tecnologia a transmissão de dados teve maior avanço tanto na taxa de envio quanto na qualidade, em relação a gerações anteriores, com isso é interessante analisar como se comporta a rede com os recursos alocados entre os usuários.

Após o estudo das redes simuladas, onde analisamos a vazão e o PDR, concluímos que em geral os algoritmos se comportam de forma semelhante, e que apenas em algumas redes houve diferenças de algum algoritmo em relação aos demais. O algoritmo Throughput to Average se mostrou menos eficiente em relação a distribuição de recursos aos usuários, com menor vazão agregada em alguns casos.

Para trabalhos futuros poderia ser feito novas simulações, que poderia testar outros algoritmos e compará-los, e analisar redes quando os dispositivos móveis estão em movimento. Outro trabalho interessante seria tentar implementar um novo algoritmo tentando pegar aspectos positivos dos algoritmos que sobressaem em relação aos demais em cada situação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANATEL. *Brasil alcança 265,7 milhões de acessos móveis em junho*. 2013. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalPaginaEspecialPesquisa.do?acao=&tipoConteudoHtml=1&codNoticia=29585>>. Acesso em: 3 de fevereiro. 2014.
- ANATEL. *Equipamentos 4G*. 2014. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalNivelDois.do?acao=&codItemCanal=1856&codigoVisao=4&nomeVisao=Cidad{%}E3o&&codCanal=443&nomeCanal=Equipamentos{%}204G&nomeItemCanal=Equipamentos{%}204G>>. [Acesso em: 3 de fevereiro. 2014.].
- BEH, K. C.; DOUFEXI, A.; ARMOUR, S. Performance evaluation of hybrid arq schemes of 3gpp lte ofdma system. In: IEEE. *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007. IEEE 18th International Symposium on*. [S.l.], 2007. p. 1–5.
- BETTSTETTER, C.; VOGEL, H.-J.; EBERSPACHER, J. Gsm phase 2+ general packet radio service gprs: Architecture, protocols, and air interface. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE, IEEE*, v. 2, n. 3, p. 2–14, 1999.
- CAPOZZI, F.; PIRO, G.; GRIECO, L. A.; BOGGIA, G.; CAMARDA, P. Downlink packet scheduling in lte cellular networks: Key design issues and a survey. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE, IEEE*, v. 15, n. 2, p. 678–700, 2013.
- CHANDRAN, N.; VALENTI, M. C. Three generations of cellular wireless systems. *Potentials, IEEE, IEEE*, v. 20, n. 1, p. 32–35, 2001.
- DILLENBURG, M. R. Alternativas de aplicação do serviço gprs da rede celular gsm em telemetria pela internet. *Revista InTech*, n. 56, 2012.
- FURUSKAR, A.; MAZUR, S.; MULLER, F.; OLOFSSON, H. Edge: Enhanced data rates for gsm and tdma/136 evolution. *Personal Communications, IEEE, IEEE*, v. 6, n. 3, p. 56–66, 1999.
- GURTOV, A.; PASSOJA, M.; AALTO, O.; RAITOLA, M. Multi-layer protocol tracing in a gprs network. In: IEEE. *Vehicular Technology Conference, 2002. Proceedings. VTC 2002-Fall. 2002 IEEE 56th*. [S.l.], 2002. v. 3, p. 1612–1616.
- KUROSE, J.; ROSS, K. *Redes de Computadores e Internet*. [S.l.: s.n.], 2010.
- MATOS, J. G.; JUNIOR, J. P.; JUNIOR, J. A.; NETO, A. Avaliação da qualidade de vídeo e voip em sistema lte com diferentes algoritmos de escalonamento utilizando métricas de qos. *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações-SBrT*, v. 12, p. 13–16, 2012.

MELO, E. H. de. Análise de tráfego de redes 3g/hspa. Centro de Informatica Universidade Federal Pernambuco, 2010.

NOHRBORG, M. *LTE Overview*. 2013. Disponível em: <<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>>. [Acesso em: 15 de Abril. 2014.].

PIRO, G.; GRIECO, L. A.; BOGGIA, G.; CAMARDA, P. A two-level scheduling algorithm for qos support in the downlink of lte cellular networks. In: IEEE. *Wireless Conference (EW), 2010 European*. [S.l.], 2010. p. 246–253.

SALVADOR, C. J.; MEDEIROS, D. d. S. de; SILVA, F. E. da. Transmissão de seqüências de imagens através da rede celular gsm/edge. *II Jornada da Produção Científica da Educação Profissional e Tecnológica da Região Sul, Pelotas*, 2008.

SHREEDHAR, M.; VARGHESE, G. Efficient fair queueing using deficit round robin. In: ACM. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. [S.l.], 1995. v. 25, n. 4, p. 231–242.

ZHOU, D.; BALDO, N.; MIOZZO, M. Implementation and validation of lte downlink schedulers for ns-3. In: ICST (INSTITUTE FOR COMPUTER SCIENCES, SOCIAL-INFORMATICS AND TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING). *Proceedings of the 6th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*. [S.l.], 2013. p. 211–218.

A SCRIPT DAS SIMULAÇÕES

O código abaixo foi utilizado para criação das topologias em estudo, escrito na linguagem C++. As simulações foram feitas no simulador NS3.

```
#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/network-module.h"
#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/mobility-module.h"
#include "ns3/lte-module.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/point-to-point-module.h"
#include "ns3/config-store-module.h"
#include "ns3/lte-helper.h"
#include "ns3/epc-helper.h"
#include "ns3/netanim-module.h"
#include "ns3/packet-sink.h"
#include "ns3/config-store.h"
#include "ns3/ipv4-static-routing-helper.h"
#include "ns3/ipv4-list-routing-helper.h"
#include "ns3/flow-monitor-module.h"
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <vector>
#include <string>

using namespace ns3;

NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("LTE_Example");

int
main (int argc, char *argv[])
{

    uint16_t numberOfUes = 25;
```

```

uint16_t numberOfEnbs = 1;
uint16_t numBearersPerUe = 1;
double simTime =5;
double distance =50;
double semente= 7512; //semente
double run = 9;    // descolamento da semente

Config::SetDefault ("ns3::UdpClient::Interval",
                    TimeValue (Milliseconds(10)));
Config::SetDefault ("ns3::UdpClient::MaxPackets",
                    UIntegerValue(1000000));
Config::SetDefault ("ns3::LteHelper::UseIdealRrc",
                    BooleanValue(false));
Config::SetDefault ("ns3::LteEnbRrc::SrsPeriodicity",
                    UIntegerValue (160));

// argumentos da linha de comando
CommandLine cmd;
cmd.AddValue("numberOfUes", "Number of UEs", numberOfUes);
cmd.AddValue("numberOfEnbs", "Number of eNodeBs", numberOfEnbs);
cmd.AddValue("simTime", "Total duration of the simulation
              (in seconds)", simTime);
cmd.AddValue("run", "Total repeticoes da simulacao", run);
cmd.AddValue("distance", "distancia entre os UEs ", distance);
cmd.Parse(argc, argv);

    // definindo a semente
SeedManager::SetSeed (semente);
SeedManager::SetRun (run);

Ptr<LteHelper> lteHelper = CreateObject<LteHelper> ();
Ptr<EpcHelper> epcHelper = CreateObject<EpcHelper> ();
lteHelper->SetEpcHelper (epcHelper);
lteHelper->SetSchedulerType ("ns3::PFFfMacScheduler");

```

```

Ptr<Node> pgw = epcHelper->GetPgwNode ();

// criando um RemoteHost
NodeContainer remoteHostContainer;
remoteHostContainer.Create (1);
Ptr<Node> remoteHost = remoteHostContainer.Get (0);
InternetStackHelper internet;
internet.Install (remoteHostContainer);

// Criando a internet
PointToPointHelper p2ph;
p2ph.SetDeviceAttribute ("DataRate", DataRateValue
    (DataRate ("100Gb/s")));
p2ph.SetDeviceAttribute ("Mtu", UIntegerValue (1500));
p2ph.SetChannelAttribute ("Delay", TimeValue (Seconds (0.010)));
NetDeviceContainer internetDevices = p2ph.Install
    (pgw, remoteHost);
Ipv4AddressHelper ipv4h;
ipv4h.SetBase ("1.0.0.0", "255.0.0.0");
Ipv4InterfaceContainer internetIpIfaces = ipv4h.Assign
    (internetDevices);
Ipv4Address remoteHostAddr = internetIpIfaces.GetAddress (1);

// Roteamento do Host na internet para rede LTE
Ipv4StaticRoutingHelper ipv4RoutingHelper;
Ptr<Ipv4StaticRouting> remoteHostStaticRouting = ipv4Routing
    Helper.GetStaticRouting (remoteHost->GetObject<Ipv4> ());
// interface 0 e localhost, 1 e dispositivo p2p
remoteHostStaticRouting->AddNetworkRouteTo (Ipv4Address
    ("7.0.0.0"), Ipv4Mask ("255.0.0.0"), 1);

NodeContainer ueNodes;
NodeContainer enbNodes;

```

```

enbNodes.Create(numberOfEnbs);
ueNodes.Create(numberOfUes);

MobilityHelper mobility;
mobility.SetPositionAllocator ("ns3::GridPositionAllocator",
                               "MinX", DoubleValue (0.0),
                               "MinY", DoubleValue (0.0),
                               "DeltaX", DoubleValue (distance),
                               "DeltaY", DoubleValue (0.0),
                               "GridWidth", UIntegerValue
                               (numberOfUes+1),
                               "LayoutType", StringValue
                               ("RowFirst"));

mobility.SetMobilityModel ("ns3::BuildingsMobilityModel");
mobility.Install (enbNodes);

mobility.SetMobilityModel ("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility.Install (ueNodes);
mobility.Install (remoteHost);

// Instalacao dos dispositivos LTE no ENB e UEs
NetDeviceContainer enbLteDevs = lteHelper->InstallEnbDevice
    (enbNodes);
NetDeviceContainer ueLteDevs = lteHelper->InstallUeDevice
    (ueNodes);

// instalacao da pilha de enderecos IP aos UEs
internet.Install (ueNodes);
Ipv4InterfaceContainer ueIpIfaces;
ueIpIfaces = epcHelper->AssignUeIpv4Address (NetDeviceContainer
    (ueLteDevs));
// Atribuicao dos enderecos IP dos UEs,

```

```

// e instalacao das aplicacoes
for (uint32_t u = 0; u < ueNodes.GetN (); ++u)
{
    Ptr<Node> ueNode = ueNodes.Get (u);
    // Set the default gateway for the UE
    Ptr<Ipv4StaticRouting> ueStaticRouting = ipv4RoutingHelper.
        GetStaticRouting (ueNode->GetObject<Ipv4> ());
    ueStaticRouting->SetDefaultRoute (epcHelper->GetUeDefault
        GatewayAddress (), 1);
}

// Ataque de todos os UEs ao primeiro eNodeB
for (uint16_t i = 0; i < numberOfUes; i++)
{
    lteHelper->Attach (ueLteDevs.Get(i), enbLteDevs.Get(0));
}

NS_LOG_LOGIC ("setting up applications");

// Instalar e iniciar as aplicacoes nos UES e remote host
uint16_t dlPort = 10000;
uint16_t ulPort = 20000;

Ptr<UniformRandomVariable> startTimeSeconds = CreateObject<
    UniformRandomVariable> ();
startTimeSeconds->SetAttribute ("Min", DoubleValue (0));
startTimeSeconds->SetAttribute ("Max", DoubleValue (0.010));

for (uint32_t u = 0; u < numberOfUes; ++u)
{
    Ptr<Node> ue = ueNodes.Get (u);
    Ptr<Ipv4StaticRouting> ueStaticRouting = ipv4RoutingHelper.
        GetStaticRouting (ue->GetObject<Ipv4> ());
    ueStaticRouting->SetDefaultRoute (epcHelper->GetUeDefault
        GatewayAddress (), 1);
}

```

```

for (uint32_t b = 0; b < numBearersPerUe; ++b)
{
    ++dlPort;
    ++ulPort;

    ApplicationContainer clientApps;
    ApplicationContainer serverApps;

    NS_LOG_LOGIC ("installing UDP DL app for UE " << u);
    UdpClientHelper dlClientHelper (ueIpIfaces.GetAddress (u)
        , dlPort);
    clientApps.Add (dlClientHelper.Install (remoteHost));
    PacketSinkHelper dlPacketSinkHelper ("ns3::UdpSocket
        Factory", InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny ()
        , dlPort));
    serverApps.Add (dlPacketSinkHelper.Install (ue));

    NS_LOG_LOGIC ("installing UDP UL app for UE " << u);
    UdpClientHelper ulClientHelper (remoteHostAddr, ulPort);
    clientApps.Add (ulClientHelper.Install (ue));
    PacketSinkHelper ulPacketSinkHelper ("ns3::UdpSocket
        Factory", InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny (),
        ulPort));
    serverApps.Add (ulPacketSinkHelper.Install (remoteHost));

    Ptr<EpcTft> tft = Create<EpcTft> ();
    EpcTft::PacketFilter dlpf;
    dlpf.localPortStart = dlPort;
    dlpf.localPortEnd = dlPort;
    tft->Add (dlpf);
    EpcTft::PacketFilter ulpf;
    ulpf.remotePortStart = ulPort;
    ulpf.remotePortEnd = ulPort;
    tft->Add (ulpf);
}

```

```

        EpsBearer bearer (EpsBearer::NGBR_VIDEO_TCP_DEFAULT);
        lteHelper->ActivateDedicatedEpsBearer (ueLteDevs.Get (u),
            bearer, tft);

        Time startTime = Seconds (startTimeSeconds->GetValue ());
        serverApps.Start (startTime);
        clientApps.Start (startTime);

    } // end for b
}

//
// Calculo vazao usando Flowmonitor
//

FlowMonitorHelper flowmon;
Ptr<FlowMonitor> monitor;
monitor = flowmon.Install(ueNodes);
monitor = flowmon.Install(enbNodes);
monitor = flowmon.Install(remoteHostContainer);
monitor->SetAttribute("DelayBinWidth", DoubleValue(0.001));
monitor->SetAttribute("JitterBinWidth", DoubleValue(0.001));
monitor->SetAttribute("PacketSizeBinWidth", DoubleValue(20));

//
// iniciando a simulacao.
//

NS_LOG_INFO ("Run Simulation.");
Simulator::Stop (Seconds(simTime));
Simulator::Run ();

monitor->CheckForLostPackets ();

Ptr<Ipv4FlowClassifier> classifier = DynamicCast<Ipv4Flow

```

```

        Classifier> (flowmon.GetClassifier ());
    std::map<FlowId, FlowMonitor::FlowStats> stats = monitor->
        GetFlowStats ();
    uint32_t geralthroughput = 0;
    double txPacketsum = 0;
    double rxPacketsum = 0;
    //uint32_t geralthroughput_control = 0;

//
// ANALIZANDO CADA FLUXO
//

for (std::map<FlowId, FlowMonitor::FlowStats>::const_iterator i=
    stats.begin (); i != stats.end (); ++i)
    {
        Ipv4FlowClassifier::FiveTuple t = classifier->FindFlow
            (i->first);

        if(t.destinationAddress != "10.0.0.6" && t.sourceAddress
            != "1.0.0.2")
        {
            std::cout << "Flow " << i->first << " (" <<
                t.sourceAddress << " -> " << t.destination
                Address << ") \n";
            std::cout << " Throughput: " << i->second.rxBytes
                * 8.0 / (i->second.timeLastRxPacket.
                    GetSeconds() - i->second.timeFirstTxPacket.
                    GetSeconds())/1000 << " Kbps \n";

            geralthroughput += i->second.rxBytes * 8.0;
            txPacketsum += i->second.txPackets;
            rxPacketsum += i->second.rxPackets;
        }
    }
}

```

```
//  
// ANALIZANDO TODA REDE  
//  
std::cout << " (geralthroughput/simTime) / 1000.0 << " Kbps\n";  
NS_LOG_INFO ("All Tx Packets");  
NS_LOG_INFO (txPacketsum);  
NS_LOG_INFO ("All Rx Packets");  
NS_LOG_INFO (rxPacketsum);  
std::cout << " PDR: " << (rxPacketsum/txPacketsum)*100 << "%\n";  
  
Simulator::Destroy ();  
return 0;  
}
```