



Ricardo Takaki

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SERVIÇO DE VOZ EM UM SISTEMA LTE DE 450 MHz

Campinas

2015



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Ricardo Takaki

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SERVIÇO DE VOZ EM UM SISTEMA LTE DE 450 MHZ

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

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cardieri

Este exemplar corresponde à versão final da tese defendida pelo aluno Ricardo Takaki, e orientada pelo Prof. Dr. Paulo Cardieri

Campinas

2015

Agência de fomento: Não se aplica
Nº processo: Não se aplica

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

T139a Takaki, Ricardo, 1975-
Análise de desempenho de serviço de voz em um sistema LTE de 450 MHz
/ Ricardo Takaki. – Campinas, SP : [s.n.], 2015.

Orientador: Paulo Cardieri.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade
de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sistema de comunicação sem fio. I. Cardieri, Paulo, 1964-. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Performance analysis of VoIP service in LTE 450 MHz

Palavras-chave em inglês:

Wireless communications

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Paulo Cardieri [Orientador]

José Antonio Martins

Gustavo Fraidenraich

Data de defesa: 03-08-2015

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Ricardo Takaki

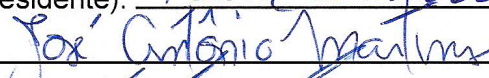
Data da Defesa: 3 de agosto de 2015

Título da Tese: "Análise de Desempenho de Serviço de Voz em um Sistema LTE de 450 MHz"

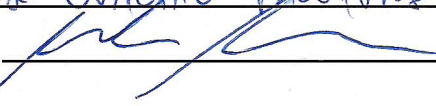
Prof. Dr. Paulo Cardieri (Presidente):



Dr. José Antonio Martins:



Prof. Dr. Gustavo Fraidenaich:



Resumo

Nesse trabalho é apresentada uma análise de desempenho de chamadas *Voice over IP* (VoIP) em um sistema celular 4G/LTE na faixa de 450 MHz. O sistema investigado empregou um algoritmo de escalonamento para o tratamento dos serviços concorrentes VoIP e dados. Os testes foram realizados em uma rede *Long Term Evolution* (LTE) implementada em laboratório, empregando equipamentos protótipos. Os resultados mostram que o uso de um algoritmo de escalonamento permite atribuir prioridade no atendimento das chamadas VoIP, resultando em uma qualidade de serviço aceitável, mesmo na presença de tráfego de dados concorrente.

Palavras-chaves: LTE 450 MHz; VoIP; atraso; *jitter*; MOS; QoS.

Abstract

This work presents a performance analysis of Voice over IP (VoIP) calls in a 4G / LTE 450 MHz cellular system. The investigated system employed a scheduling algorithm for the treatment of competing VoIP and data services. The tests were performed in an LTE network implemented in the laboratory using a prototype equipment. The results show that the use of a scheduling algorithm allows the priority assignment to meet the VoIP calls, resulting in an acceptable quality of service, even in the presence of data traffic competitor.

Keywords: LTE 450 MHz; VoIP; delay; *jitter*; MOS; QoS.

Sumário

1	Introdução	1
2	Arquitetura LTE	3
2.1	LTE 450MHz	3
2.2	Componentes da arquitetura LTE	5
2.2.1	Terminal UE	5
2.2.2	eNodeB	6
2.2.3	EPC	7
2.3	Qualidade de Serviço	8
2.3.1	Fluxo de serviço padrão e fluxo de serviço dedicado	9
2.3.2	Parâmetros de QoS	10
2.3.3	<i>QoS Class Identifier</i>	11
2.4	Escalonador QoS Aware	12
2.4.1	Algoritmo de Prioridade Ponderada	13
2.4.2	Algoritmo de <i>Token Bucket</i>	13
3	Tecnologia Voz sobre IP	17
3.1	Codificador/decodificador	17
3.2	<i>Session Initiation Protocol</i>	18
3.3	<i>Session Description Protocol</i>	21
3.4	<i>Real time Transport Protocol</i>	22
3.5	Exemplo de estabelecimento de uma sessão SIP	23
4	Métodos e ferramentas para a medição da qualidade de voz	25
4.1	latência e <i>Jitter</i>	25
4.2	<i>Mean Opinion Score</i>	26
4.3	<i>Perceptual evaluation of speech quality</i>	27
4.4	IxChariot	29
4.5	Ferramenta de geração de tráfego - IPERF	31
5	Ambiente de Testes	33
5.1	Cenários de teste	39
5.1.1	Cenário I	40
5.1.2	Cenário II	42
5.1.3	Cenário III	42
6	Resultados obtidos	47
6.1	Cenário I	47

6.1.1	Análise do MOS	50
6.1.2	Análise do atraso	50
6.2	Cenário II	51
6.3	Cenário III	54
7	Conclusão	57
	Referências	59

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pelas oportunidades e vitórias conquistadas ao longo de minha vida.

À minha querida e amada esposa pelo suporte, paciência e otimismo perante os desafios e dificuldades encontrados ao longo do desenvolvimento e escrita desse trabalho.

Às minhas queridas e amadas famílias por acreditarem no meu potencial diante desse desafio.

Ao meu orientador pelo auxílio e esclarecimento das dúvidas que surgiram ao longo dessa jornada de aprendizado.

A todos os colegas de trabalho que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento e obtenção de resultados para a evolução e conclusão desse trabalho.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Componentes que formam a arquitetura LTE.	5
Figura 2 – Arquitetura modular de um terminal UE.	5
Figura 3 – Terminal <i>User Equipment</i> de 450 MHz.	6
Figura 4 – Estação Base de 450 MHz.	8
Figura 5 – Arquitetura de fluxo de serviço de EPS e TFTs.	9
Figura 6 – Tipos de fluxos de serviços.	10
Figura 7 – <i>Token Bucket</i> tradicional.	14
Figura 8 – Exemplo de estabelecimento e término de uma sessão multimídia utilizando o protocolo SIP.	23
Figura 9 – Algoritmo PESQ.	28
Figura 10 – Estrutura do PESQ.(PSYTECHNICS, 2001)	28
Figura 11 – Teste básico utilizando a ferramenta IxChariot.	30
Figura 12 – Cenário utilizado para os testes de voz.	33
Figura 13 – Exemplo de criação de 20 pares correspondentes a 20 chamadas VoIP. . .	36
Figura 14 – Exemplo de configuração de um par VoIP utilizando o IxChariot.	37
Figura 15 – Posição do terminal na célula da eNodeB.	41
Figura 16 – Pacotes UDP de voz obtidos pelo <i>wireshark</i>	43
Figura 17 – Pacotes UDP convertidos para RTP através do <i>wireshark</i>	43
Figura 18 – Pacotes RTP convertidos para RAW através do <i>wireshark</i>	44
Figura 19 – Pacotes RAW convertidos para WAV através do <i>audacity</i>	44
Figura 20 – Comparação de valores de MOS obtidos para o tráfego de voz utilizando QCI = 1 e QCI = 7, sem e com tráfego concorrente	49
Figura 21 – Comparação de valores de atraso obtidos para o tráfego de voz utilizando QCI = 1 e QCI = 7, sem e com tráfego concorrente	49
Figura 22 – Valores de MOS, Atraso e <i>Jitter</i> obtidos para o tráfego de voz através do fluxo de serviço com QCI = 1 e do fluxo de serviço com QCI = 7 e vazão de donwlink do tráfego concorrente para o cenário de teste II.	52
Figura 23 – Comparação do MOS-LQ0 entre os QCIs 1 e 7 para o tráfego de voz. . .	55
Figura 24 – Comportamento da vazão do tráfego concorrente que passa pelo fluxo de serviço padrão.	55

Lista de tabelas

Tabela 1 – Características padronizadas de QCI. (3GPP, 2014b)	12
Tabela 2 – <i>Codecs</i> de voz mais utilizados e suas características (CISCO, 2006) . . .	18
Tabela 3 – <i>Codecs</i> de voz utilizados no sistema LTE e suas características (3GPP, 2013b) (3GPP, 2014d) (IIS, 2015)	18
Tabela 4 – Mensagens enviadas através do protocolo SIP.	20
Tabela 5 – Mensagens de respostas do protocolo SIP.	21
Tabela 6 – exemplo de mensagem <i>INVITE</i> com a respectiva informação SDP	24
Tabela 7 – Exemplos de identificadores utilizados com MOS.	26
Tabela 8 – Pontuação MOS.	27
Tabela 9 – Parâmetros usados na criação do fluxo de serviço padrão.	35
Tabela 10 – Parâmetros usados na criação do serviço dedicado.	35
Tabela 11 – Filtro TFT do fluxo de serviço dedicado.	35
Tabela 12 – Sintaxe da ferramenta iperf.	37
Tabela 13 – Características dos equipamentos utilizados nos testes.	38
Tabela 14 – Cenários de teste.	39
Tabela 15 – Valores de atenuação medidos para definição aproximada da posição do terminal UE na célula da eNodeB.	40
Tabela 16 – Taxas de tráfego correspondentes ao número de chamadas utilizadas para o Cenário I.	41
Tabela 17 – Utilização da ferramenta PESQ para obtenção do MOS-LQO.	45
Tabela 18 – Resultados de MOS e atraso para o Cenário I, com tráfego de voz empregando fluxo de serviço dedicado com QCI = 1, sem e com tráfego concorrente.	47
Tabela 19 – Resultados de MOS e atraso para o Cenário I, com tráfego de voz empregando fluxo de serviço dedicado com QCI = 7, sem e com tráfego concorrente.	48
Tabela 20 – Resultados obtidos para o cenário de teste II, QCI = 1, com tráfego concorrente.	51
Tabela 21 – Resultados obtidos para o cenário de teste II, QCI = 7, com tráfego concorrente.	51
Tabela 22 – Resultados obtidos para o Cenário III, QCI = 1, com tráfego concorrente.	54
Tabela 23 – Resultados obtidos para o Cenário III, QCI = 7, com tráfego concorrente.	54

Lista de Acrônimos e Abreviações

LTE	<i>Long Term Evolution</i>
UE	<i>User Equipment</i>
eNodeB	<i>Evolved eNodeB</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
EPS	<i>Evolved Packet System</i>
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communication</i>
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
1xEV-DO	<i>Evolution Data Optimized</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
IMS	<i>IP Multimedia Subsystem</i>
E-UTRAN	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i>

PDN	<i>Packet Data Network</i>
QCI	<i>QoS Class Identifier</i>
ARP	<i>Allocation and Retention Priority</i>
A-AMBR	<i>APN Aggregate Maximum Bit Rate</i>
UE-AMBR	<i>UE Aggregate Maximum Bit Rate</i>
MBR	<i>Maximum Guaranteed Bit Rate</i>
GBR	<i>Guaranteed Bit Rate</i>
non-GBR	<i>non-Guaranteed Bit Rate</i>
UL TFT	<i>Uplink Traffic Flow Template</i>
DL TFT	<i>Downlink Traffic Flow Template</i>
SDF	<i>Service Data Flow</i>
E-RAB	<i>E-UTRAN Radio Access Bearer</i>
PDB	<i>Packet Delay Budget</i>
PELR	<i>Packet Error Loss Rate</i>
USIM	<i>Universal Subscriber Identity Module</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
SGW	<i>Serving Gateway</i>
PGW	<i>PDN Gateway</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
RLC	<i>Radio Link Control</i>
RRC	<i>Radio Resource Control</i>
PDCP	<i>Packet Data Convergence Protocol</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i>

ARQ *Automatic Repeat Request*

PHY *Physical Layer*

PDSCH *Physical Downlink Shared Channel*

PUSCH *Physical Uplink Shared Channel*

PDCCH *Physical Downlink Control Channel*

TTI *Transmission Time Interval*

SIP *Session Initiation Protocol*

SDP *Session Description Protocol*

RTP *Realtime Transport Protocol*

RTCP *RTP Control Protocol*

PCM *Pulse Code Modulation*

AMR-WB *Adaptive Multi-Rate Wideband (codec)*

EVS *Enhanced Voice Services (coder)*

MOS *Mean Opinion Score*

PESQ *Perceptual Evaluation of Speech Quality*

SNR *Signal to Noise Ratio*

SIM *Subscriber Identity Module*

IETF *Internet Engineering Task Force*

HTTP *Hypertext Transfer Protocol*

SMTP *Simple Mail Transfer Protocol*

1 Introdução

A tecnologia *Long Term Evolution* (LTE) (3GPP, 2014e)(3GPP, 2014f) vem sendo desenvolvida e utilizada nas suas diversas variantes no intuito de substituir os sistemas celulares 2G e 3G implantados mundialmente. Para áreas densamente povoadas, os sistemas LTE já instalados utilizam principalmente as faixas de frequência de 700 MHz e 2,6 GHz, esta última leiloadada em 2012 no Brasil e que também é utilizada na Europa.

A padronização do LTE para a faixa de 450 MHz está em fase avançada no 3GPP (3GPP, 2013a), sendo que a banda 31 faz parte do padrão desde julho/2013 (3GPP, 2013a). O LTE R8 (3GPP Release 8) (3GPP, 2014a) preve o suporte ao serviço *Voice Over Internet* (VoIP), definindo diferentes mecanismos de *Quality of Service* (QoS) (BASIR, 2008) que viabilizam a migração das chamadas de voz realizadas por circuitos dedicados nas tecnologias celulares anteriores, para o protocolo IP, com a manutenção da experiência do usuário similar à oferecida pelos sistemas *Global System for Mobile Communication* (GSM) e *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS).

Devido a essa tecnologia estar em fase de desenvolvimento, constatou-se a necessidade da realização de diversos testes para a verificação do comportamento das diversas funcionalidades, dentre elas, o tráfego de voz, com o serviço VoIP.

Diversos trabalhos anteriores avaliam o desempenho das chamadas *Voice Over Internet* (VoIP) em sistemas LTE: Mb. Edna Masum et al., 2011 (MASUM; BABU, 2011); Jani Puttonen et al., Setembro 2008 (PUTTONEN *et al.*, 2008b); Jani Puttonen et al., Maio 2008 (PUTTONEN *et al.*, 2008a). Estes trabalhos fizeram uso de simulação, avaliando diversas métricas num ambiente de múltiplas células, tais como atraso fim a fim e vazão na presença de tráfego de voz, além do desempenho de chamadas de voz.

O presente trabalho apresenta uma análise do serviço VoIP no sistema LTE operando na faixa de 450 MHz. Os experimentos para a avaliação do desempenho foram realizados em um ambiente controlado, ou seja, com equipamentos constituídos de software e hardware núcleo da rede LTE de 450 MHz, tais como terminais *User Equipment* (UE), *Evolved eNodeB* (eNodeB), *Evolved Packet Core* (EPC), a serem utilizados comercialmente pelas operadoras existentes no mercado.

Os experimentos realizados visaram a avaliação da qualidade do serviço de voz em diversas situações com tráfego concorrente, e situações com condições de propagação degradadas, entre outras.

Um componente central no sistema LTE empregado nos experimentos foi o escalonador, responsável por prover prioridade ao serviço de voz no acesso aos recursos de rádio.

Os resultados obtidos através dos experimentos indicam que o algoritmo empregado no escalonador atua de forma satisfatória, mantendo a qualidade e voz dentro de limites aceitáveis. Além disso, os resultados obtidos nos testes demonstram conformidade com os padrões de QoS definidos pelo 3GPP.

Este trabalho está dividido em duas partes. A primeira parte, que abrange os Capítulos 2, 3 e 4, trata da parte teórica dos assuntos discutidos nessa tese, tais como Arquitetura LTE, Tecnologia VoIP e métodos e ferramentas para medições de qualidade de voz respectivamente.

A segunda parte, que inclui os capítulos 5 e 6, trata dos experimentos realizados. O capítulo 5 descreve os cenários considerados na avaliação enquanto que o capítulo 6 apresenta os resultados.

Por fim o capítulo 7 apresenta as principais conclusões do trabalho.

2 Arquitetura LTE

O sistema *Long Term Evolution* (LTE) é um sistema de comunicação sem fio usado para aplicações de multimídia banda larga. Quando comparado com as gerações anteriores, o LTE introduz mudanças significativas em três grandes áreas: a interface aérea, a rede de rádio e rede núcleo. Para a interface aérea, o LTE introduz a tecnologia *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) (FREESCALE, 2008) e a utilização de técnicas de múltiplas antenas, tais como, a técnica *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) (AMERICAS, 2009). Como resultado da utilização dessas técnicas, a interface aérea no LTE suporta taxas de dados muito altas.

No que se refere à rede, a tecnologia LTE muda a arquitetura hierárquica das tecnologias antecessoras *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS) e *Evolution Data Optimized* (1xEV-DO) e converte a rede de rádio em uma rede distribuída baseada em IP. Uma rede core totalmente baseada em pacote IP irá substituir as redes core baseadas em circuitos chaveados, utilizado para chamadas de voz e pacotes, utilizados para comunicação de dados, fornecendo escalabilidade e redução de custos.

O LTE utiliza a tecnologia *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) (FREESCALE, 2008) para transmissão no sentido da eNodeB para terminal do usuário (UE), e a tecnologia *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) para transmissão no sentido do terminal do usuário (UE) para a eNodeB. Além disso, o LTE suporta os modos de operação *Time Division Duplex* (TDD) (ASCOM, 2012) e *Frequency Division Duplex* (FDD) (ASCOM, 2012).

As normas padronizadas pelo *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) definem a rede de acesso/rádio presentes no LTE como interface *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN). Esta rede é composta pela *Evolved NodeB* (eNodeB) (LTE-SIGNALING, 2011) que é a entidade de rede responsável pela transmissão e recepção de informação da interface de rádio, incluindo, deste modo, a modulação / demodulação, bem como a codificação / decodificação e multiplexação / demultiplexação.

2.1 LTE 450MHz

O LTE 450 MHz (TAKAKI *et al.*, 2013b) surgiu como uma proposta de tecnologia para levar serviços de banda larga até áreas servidas de forma precária, ou mesmo desprovidas de qualquer serviço de telecomunicações, como é o caso das áreas rurais e de localidades

remotas. Trata-se de um novo perfil da tecnologia LTE, com operação na banda de 450-470 MHz, que prove condições de propagação favoráveis com raios de cobertura superiores aos dos perfis atualmente padronizados no 3GPP.

Os esforços para a especificação e desenvolvimento do LTE 450 MHz foram iniciados com foco no cenário brasileiro, onde a implantação dessa tecnologia deve contribuir para atender o objetivo de prover acesso universal em todo o território nacional. Isto significa disponibilizar estes serviços em áreas rurais abrangendo grande extensão do territorial no Brasil, para uma população da ordem de 30 milhões de pessoas. Com esse propósito, o governo brasileiro recentemente criou políticas para viabilizar o uso desse espectro de 450 MHz para prover serviços a áreas rurais. Em 2012 foi realizado o leilão das licenças de operação baseado na Resolução Anatel 558/2010. Iniciativas recentes do governo de promover o Plano Nacional de Banda Larga também estão impulsionando o desenvolvimento do LTE 450 MHz como uma alternativa viável para atender os objetivos deste programa em áreas rurais. Essas ações são complementares, mas proveem condições de alavancar investimentos no setor de telecomunicações, o que auxilia a criação de um mercado ainda mais promissor e importante para esse setor.

Além do cenário de aplicação brasileiro, o LTE 450 MHz está sendo considerado pelo 3GPP como uma tecnologia global e como uma opção apropriada para implantação de redes LTE em regiões do mundo com baixa densidade demográfica.

O processo de padronização da banda de 450 MHz para o LTE foi iniciado em setembro de 2012 (3GPP, 2013a), como proposta inédita de uma empresa brasileira apresentada no 3GPP, e aborda vários desafios relacionados à canalização do espectro, coexistência com serviços adjacentes, e parâmetros de desempenho de transmissão e de recepção. O objetivo final é permitir cobertura de célula da ordem de dezenas de quilômetros, o que é requerido em cenários carentes de uma infraestrutura apropriada de rede *backhaul* e de instalação elétrica.

O estudo do desempenho do VoIP nesse cenário é ainda mais relevante do que no cenário urbano, onde as operadoras consideram atualmente o provimento de serviços de voz através das tecnologias 2G e 3G já existentes, deixando o tráfego de dados em altas taxas exclusivamente para o LTE. Para as áreas rurais, desprovidas de qualquer serviço até então, a tecnologia LTE 450MHz será possivelmente a única alternativa para prover serviços tanto de voz como de dados.

O leilão das rádios frequências na subfaixa de 2600 MHz e na subfaixa de 450 MHz no Brasil, ocorrido em 2012, exigiu uma série de obrigações para as operadoras vencedoras, dentre elas, o provimento de serviços de voz aos municípios atendidos. Ao ampliar a área de cobertura das operadoras, será requerida a instalação de telefones públicos em locais como

escolas rurais e pequenas comunidades. O LTE 450 MHz é uma alternativa para viabilizar a instalação desses telefones em áreas remotas e oferecer serviços de voz com qualidade.

2.2 Componentes da arquitetura LTE

A arquitetura LTE é formada pelas seguintes entidades: o terminal *User Equipment* (UE), que é o dispositivo utilizado pelo usuário final ou cliente que utiliza os serviços oferecidos pela tecnologia LTE, tais como voz, vídeo e dados; a eNodeB, responsável pela transmissão e recepção de informação da interface de rádio, a EPC, responsável pelas configurações de QoS e inter-conexão entre a interface aérea e o mundo IP. A Figura 1 ilustra as entidades que formam a arquitetura LTE.

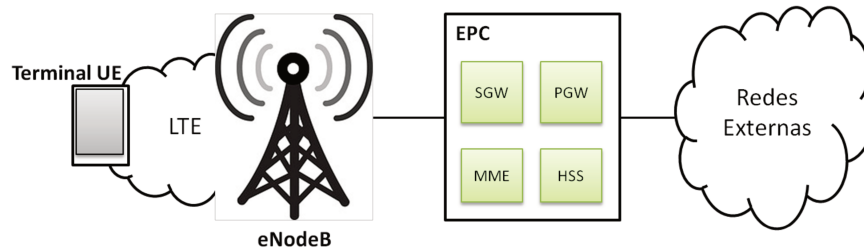


Figura 1 – Componentes que formam a arquitetura LTE.

Essas entidades são descritas nas subseções a seguir.

2.2.1 Terminal UE

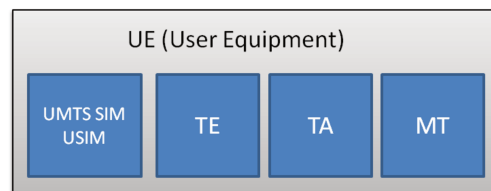


Figura 2 – Arquitetura modular de um terminal UE.

A arquitetura interna do terminal UE (TUTORIALSPPOINT, 2014) (KREHER; GÄNGER, 2011) é idêntica àquela utilizada pelo UMTS e GSM. Conforme mostrado na Figura 2, esse terminal possui os seguintes módulos:

- *Mobile Termination* (MT): O módulo MT representa a terminação da interface de rádio. Nessa entidade a sinalização *Radio Resource Control* (RRC) (3GPP, 2014c) é terminada e as mensagens RRC são enviadas.

- *Terminal Adapter* (TA): O módulo TA representa a terminação dos protocolos de serviço específicos da aplicação. O TA pode possuir uma interface externa como, por exemplo, uma interface *Universal Serial Bus* (USB) para conexão de um laptop com um serviço LTE.
- *Terminal Equipment* (TE): O módulo TE representa a terminação do serviço LTE. Dependendo das capacidades das aplicações do terminal UE, este terminal pode agir como um TE ou não. Por exemplo, o dispositivo iPhone da Apple pode ser um TE com toda sua capacidade, enquanto que um simples USB stick para transmissão de dados móveis pode não ter a capacidade de um TE. No caso do USB stick, o laptop é o módulo TE.
- UMTS SIM USIM: Esse módulo é também chamado de *Subscriber Identity Module* (SIM) card para equipamentos LTE e é responsável por executar o módulo *Universal Subscriber Identity Module* (USIM). O módulo USIM armazena os dados do usuário e é responsável por manter as informações do usuário, tais como número de telefone, *Home Network Identity* e chaves de segurança.

O terminal UE possui categorias que são grupos abstratos de capacidade de acesso de rádio comuns definidos pela norma 3GPP 36.306 (3GPP, 2013c).

A Figura 3 mostra um terminal *User Equipment* LTE desenvolvido para o sistema LTE de 450 MHz (WXBR, 2015b) utilizado para a realização dos testes nesse trabalho.



Figura 3 – Terminal *User Equipment* de 450 MHz.

2.2.2 eNodeB

eNodeB (LTESIGNALING, 2011) é uma entidade de rede, pertencente à rede de acesso *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN), responsável pela

transmissão e recepção de informação da interface de rádio incluindo, deste modo o canal de modulação / demodulação de rádio, bem como canal de codificação / decodificação e multiplexação / demultiplexação.

A eNodeB possui as seguintes funcionalidades (ABINASH, 2012):

- Compressão de cabeçalho e criptografia/descriptografia do plano de usuário.
- Seleção da *Mobility Management Entity* (MME) quando nenhuma rota para a MME pode ser determinada pela informação fornecida pelo terminal UE. A MME é explicada no capítulo 2.2.3.
- Garantia de nível de taxa de fluxo de serviço de *uplink* baseada no parâmetro UE *Aggregate Maximum Bit Rate* (UE-AMBR) e *Maximum Guaranteed Bit Rate* (MBR) via escalonador de *uplink*. Os parâmetros UE-AMBR e MBR são explicados com mais detalhes no capítulo 2.3.2.
- Garantia de nível de taxa de fluxo de serviço de *downlink*.
- Controle de nível controle de admissão de fluxo de serviço de *downlink* e *uplink*.
- Marcação de pacotes de nível de transporte no *uplink* baseada no QCI do fluxo de serviço EPS associado.
- Controle de congestionamento.

A Figura 4 mostra uma estação Base LTE desenvolvida para o sistema LTE de 450 MHz (WXR, 2015a) utilizada para a realização dos testes nesse trabalho.

2.2.3 EPC

A rede núcleo do LTE é a rede *Evolved Packet Core* (EPC) (3GPP, 2010) que é baseada totalmente no domínio IP. Os principais componentes da EPC são: a MME, *Serving Gateway* (SGW), *Packet Data Network Gateway* (PGW) e o *Home Subscriber Server* (HSS).

- MME: Entidade responsável pelo gerenciamento do contexto de mobilidade do terminal UE. Esta entidade é também responsável pela seleção do *Packet Data Network* (PDN) *gateway*, habilitando e iniciando a autenticação além de armazenar as características e configurações do usuário provenientes do HSS.
- SGW: Entidade responsável por fixar o plano de usuário utilizado pela eNodeB para *handover* e mobilidade entre padrões 3GPP.



Figura 4 – Estação Base de 450 MHz.

- PGW: Entidade responsável pela alocação do endereço IP do terminal UE e responsável também pela configuração e utilização da política de regras de qualidade de serviço específica para cada tipo de serviço que utilize a rede de dados.
- HSS: Consiste em um banco de dados dos usuários que contem informações sobre os usuários da rede. Esta entidade também é responsável pela autenticação e autorização do usuário.

2.3 Qualidade de Serviço

O sistema LTE tem a habilidade de oferecer diferentes categorias de serviços, como voz, vídeo, mensagens e troca de arquivos de dados. Essa capacidade do sistema LTE é viabilizada com a implementação de controle de QoS suportado por arquiteturas definidas pelo 3GPP. O controle de QoS no sistema *Evolved Packet System* (EPS) se dá no nível de fluxo de serviço (3GPP, 2010). O fluxo de serviço (*bearer service*) oferece a capacidade de transmissão de dados entre pontos de terminação no sistema LTE. Todo o tráfego mapeado em um fluxo de serviço específico recebe o mesmo tratamento para encaminhamento de

pacotes, que inclui, por exemplo, a aplicação de políticas de escalonamento e políticas de gerenciamento de filas. Para a obtenção de diferentes tratamentos de encaminhamento de pacotes são necessários diferentes fluxos de serviço: o fluxo de serviço padrão (*default bearer*) e o fluxo de serviço dedicado (*dedicated bearer*). (TAKAKI *et al.*, 2013a)

2.3.1 Fluxo de serviço padrão e fluxo de serviço dedicado

O fluxo de serviço padrão é estabelecido quando o terminal do usuário (UE) se conecta a uma *Packet Data Network* (PDN) e é mantido durante toda a existência dessa conexão, que proporciona conectividade IP. Esse fluxo apresenta capacidade de atender requisitos de QoS básico. Para cada PDN ao qual o UE se conecta, um fluxo de serviço padrão é estabelecido.

Qualquer fluxo de serviço adicional estabelecido entre o UE e a mesma conexão PDN, resultante de demanda por serviços com necessidades específicas de QoS, é denominado fluxo de serviço dedicado. Os fluxos ainda podem ser classificados como GBR (*Guaranteed Bit Rate*) ou non-GBR (*non-Guaranteed Bit Rate*). O fluxo de serviço é caracterizado como fluxo GBR quando os recursos de rede referentes ao valor de GBR associado são permanentemente alocados na constituição ou na modificação do fluxo de serviço. Caso contrário, é caracterizado como fluxo de serviço non-GBR, no qual não há garantia de que a taxa de *bits* atribuída será suportada, pois o fluxo de serviço não garante que o valor da taxa de *bits* atribuída será permanentemente alocado.

A cada fluxo de serviço é associado um conjunto de filtros de pacotes IP, que permite que o tráfego de usuário seja encaminhado ao fluxo de serviço adequado, conforme as necessidades específicas de QoS. O mecanismo de filtragem é realizado no *uplink* e no *downlink* pelo *Uplink Traffic Flow Template* (UL TFT) e *Downlink Traffic Flow Template* (DL TFT), respectivamente (ver Figura 5).

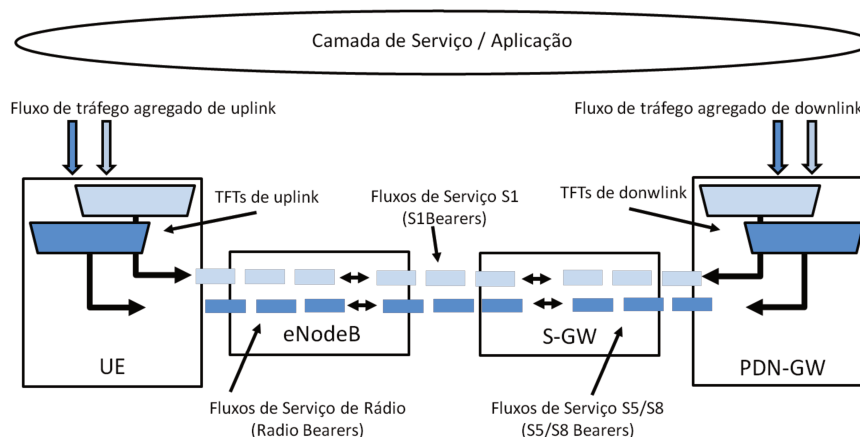


Figura 5 – Arquitetura de fluxo de serviço de EPS e TFTs.

2.3.2 Parâmetros de QoS

O perfil de QoS de um fluxo de serviço inclui os parâmetros *QoS Class Identifier* (QCI), *Allocation and Retention Priority* (ARP), *Guaranteed Bit Rate* (GBR) e *Maximum Guaranteed Bit Rate* (MBR). Para fluxos de serviço non-GBR, os parâmetros QCI e ARP são especificados. Para fluxos de serviço GBR, além dos parâmetros QCI e ARP, também são especificados os parâmetros GBR e MBR.

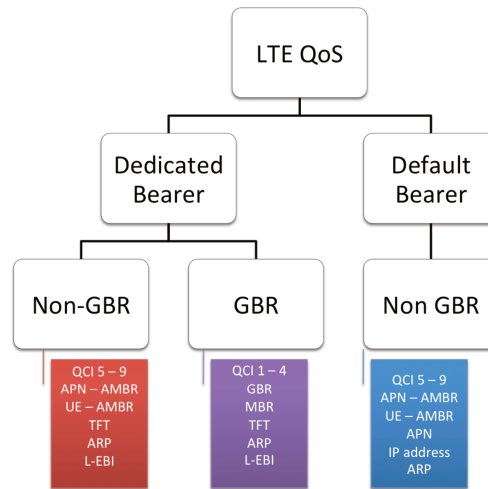


Figura 6 – Tipos de fluxos de serviços.

A Figura 6 mostra os tipos de fluxos de serviços utilizados pela arquitetura de QoS no LTE e seus respectivos parâmetros. De acordo com essa figura, os fluxos de serviço dedicados podem ser subdivididos nos tipos Non-GBR e GBR. Fluxos de serviço do tipo GBR fornecem taxas de bit garantidas e são associados a parâmetros tais como GBR e MBR.

- GBR: Fornece a taxa de *bit* garantida mínima por fluxo de serviço EPS.
- MBR: Fornece a taxa de *bit* garantida máxima por fluxo de serviço EPS.

Ambos os parâmetros GBR e MBR são especificados independentemente para *uplink* ou *downlink*.

Fluxos de serviços Non-GBR são associados a parâmetros tais como A-AMBR e UE-AMBR.

- A-AMBR: A máxima taxa de *bit* APN agregada corresponde à máxima taxa non-GBR permitida para um APN específico.

- UE-AMBR: A máxima taxa de *bit* UE agregada corresponde à máxima taxa non-GBR permitida entre todos os APN para um terminal UE específico.

Convém também observar que o fluxo de serviço padrão somente pode ser do tipo non-GBR.

Outros termos importantes são associados com cada tipo de fluxo de serviço, estes termos são:

- ARP: o parâmetro ARP é basicamente usado para decidir quando uma modificação no fluxo de serviço ou uma requisição de estabelecimento deve ser aceita considerando-se a situação atual de recursos da rede.
- TFT: O parâmetro TFT é sempre associado a um fluxo de serviço dedicado, sendo que um fluxo de serviço padrão pode ou não ter o TFT. Os fluxos de serviço dedicados garantem o atendimento dos requisitos de QoS para um serviço ou aplicação especiais e o TFT define regras de modo que o terminal UE e a rede conhecem qual pacote IP deve ser enviado para um particular fluxo de serviço dedicado.
- *Linked EPS bearer ID* (L-EBI): O parâmetro L-EBI é responsável por informar ao fluxo de serviço dedicado a qual fluxo de serviço padrão ele está conectado.
- IP Address / PDN: Cada fluxo de serviço padrão é conectado com algum PDN e tem seu próprio endereço IP associado a esse PDN, enquanto que o fluxo de serviço dedicado não necessita deste IP uma vez que este está conectado ao fluxo de serviço padrão. Além disso, o endereço IP também pode ser atribuído juntamente com o estabelecimento do fluxo de serviço padrão.

2.3.3 QoS Class Identifier

O parâmetro *QoS Class Identifier* (QCI) define a classe de QoS associada a um fluxo de serviço. Ele é usado como referência a parâmetros específicos que controlam o tratamento de encaminhamento de pacotes no fluxo de serviço. Para cada valor de QCI são definidas as seguintes características: tipo de recurso, nível de prioridade, atraso – *Packet Delay Budget* (PDB) e taxa de perda de pacotes – *Packet Error Loss Rate* (PELR). São nove os valores de QCI definidos pelo 3GPP, conforme Tabela 1. Fluxos de serviço de voz, vídeo, mensagens e transferência de arquivos apresentam diferentes características e são associados a diferentes QCI. Os QCIs são padronizados para garantir que aplicações e serviços mapeados em determinados QCIs recebam o mesmo nível de QoS mínimo em implantações compostas por

redes com vários fornecedores, bem como no caso de *roaming* que envolve diferentes redes na prestação do serviço.

QCI	Tipo de Recurso	Nível de Prioridade	PDB(ms)	PELR(%)	Serviços
1	GBR	2	100	10^{-2}	voz conversacional
2		4	150	10^{-3}	vídeo conversacional (<i>live streaming</i>)
3		3	50	10^{-3}	jogos em tempo real
4		5	300	10^{-6}	vídeo não conversacional (<i>buffered streaming</i>)
5	NON-GBR	1	100	10^{-6}	sinalização IMS
6		6	300	10^{-6}	vídeo (<i>buffered streaming</i>)
7		7	100	10^{-3}	serviços baseados em TCP voz, vídeo (<i>live streaming</i>)
8		8	100	10^{-6}	jogos interativos
9		9	300	10^{-6}	vídeo (<i>buffered streaming</i>) serviços baseados em TCP

Tabela 1 – Características padronizadas de QCI. (3GPP, 2014b)

O parâmetro *Guaranteed Bit Rate* (GBR) identifica a taxa de *bits* que deve ser garantida para um fluxo de serviço GBR, enquanto o parâmetro MBR estabelece a máxima taxa de *bits* permitida para o fluxo de serviço GBR. Semelhantemente aos identificadores de QoS atribuídos aos fluxos de serviço dedicados, que garantem as condições necessárias para o tráfego de pacotes de voz, tais como tipo de recurso, nível de prioridade, PDB e PELR, o escalonador também é de grande importância para garantir o correto escalonamento dos vários pacotes que percorrem a estação base eNodeB.

2.4 Escalonador QoS Aware

O escalonador MAC (LIMITED, 2011) é um componente importante encontrado na pilha de protocolos da eNodeB. Ele é responsável pelo escalonamento dos recursos utilizados pelos canais de *uplink* e *downlink* para prover QoS para os fluxos de rádio ativos.

Para o canal de *downlink*, a subcamada *Medium Access Control* (MAC) pertencente à eNodeB constrói um bloco de transporte para um terminal UE específico utilizando, para isto, um ou mais blocos de recurso de sinalização e/ou de dados. Para o canal de *uplink*, o mesmo processo é realizado pela subcamada MAC do terminal UE. O escalonador MAC é executado a cada subquadro *Transmission Time Interval* (TTI) de 1ms definido pela arquitetura LTE, e aloca os recursos de rádio para serem usados em canais de *downlink* e *uplink*.

As funções de recurso de escalonamento podem ser divididos em:

- Escalonamento de canal compartilhado: este recurso envolve a alocação de recursos de rádio que podem ser usados pelos canais compartilhados *Physical Downlink Shared*

Channel (PDSCH) e *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH) para a transmissão de dados dos planos de usuário e controle.

- Escalonamento de canal de controle: este recurso envolve o escalonamento de recursos utilizados no canal de controle de *downlink Physical Downlink Control Channel* (PDCCH). Este canal é usado para comunicação de recursos de *downlink* e *uplink* em canais de compartilhamento.

Os algoritmos usados pelo escalonador MAC para alocar recursos de rádio tem um efeito significativo no desempenho tanto da eNodeB individual como na rede de acesso LTE como um todo. Estes algoritmos são também implementações específicas e dependem dos cenários de utilização e desenvolvimento.

O escalonador *QoS Aware* (TAKAKI *et al.*, 2013a), implementado na estação-base eNodeB, possui dois estágios:

- Algoritmo de Prioridade Ponderada;
- Algoritmo de *Token Bucket*.

2.4.1 Algoritmo de Prioridade Ponderada

No primeiro estágio, o escalonador utiliza disciplinas baseadas em peso para permitir uma melhor alocação de recursos e maior isolamento entre cada fluxo. O algoritmo utilizado neste estágio é baseado no algoritmo de prioridade ponderada (*Weighted Priority Algorithm*) (RAS-TOGI, 2012). Esse algoritmo proprietário basicamente calcula a prioridade ponderada de cada fluxo de serviço criado, de acordo com aspectos relacionados à modulação, classe de serviço, atraso e priorização de tráfego. Uma vez atribuídas as prioridades aos fluxos de serviço, os recursos são alocados conforme a ordem de prioridade atribuída, até que todos os fluxos de serviço sejam atendidos ou até que todos os recursos se esgotem.

2.4.2 Algoritmo de *Token Bucket*

No segundo estágio, o escalonador utiliza um procedimento responsável pela determinação de qual pacote deve ser transmitido no próximo *Transmission Time Interval* (TTI). Esse procedimento é baseado no algoritmo *Token Bucket*. O algoritmo *Token Bucket* utilizado pelo escalonador *QoS Aware* presente na eNodeB corresponde a uma variação do algoritmo do balde furado (*Leaky Bucket*) (TANENBAUM, 1997). O algoritmo do balde furado força um padrão de saída rígido na taxa média, independentemente da irregularidade do tráfego.

O algoritmo *Token Bucket* permite que a saída aumente um pouco a sua velocidade quando chegarem rajadas maiores. No *token bucket*, o balde furado retém *tokens*, gerados por um relógio na taxa de um *token* a cada δt segundos. Um exemplo de utilização do algoritmo, de acordo com (TANENBAUM, 1997), é mostrado nas Figura 7 (a e b).

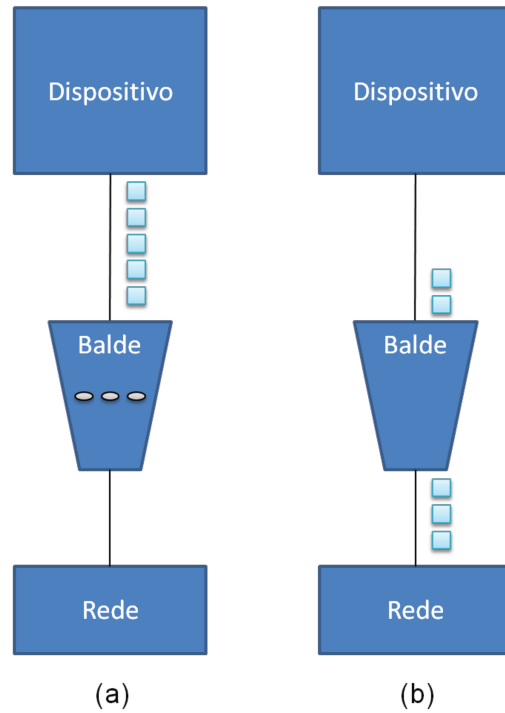


Figura 7 – *Token Bucket* tradicional.

Na Figura 7 (a), vemos um balde com três *tokens*, com cinco pacotes aguardando serem transmitidos. Para que um pacote seja transmitido, ele deve capturar e destruir um *token*. Na Figura 7 (b), vemos que três dos cinco pacotes percorreram todo o caminho, e os outros dois pacotes estão aguardando que dois outros *tokens* sejam gerados para seguir seus destinos. O algoritmo de balde de *tokens* possibilita um tipo de moldagem de tráfego diferente daquele conseguido com o algoritmo de balde furado. O algoritmo de balde furado não deixa que dispositivos inativos poupem *tokens* para enviar rajadas maiores posteriormente. O algoritmo de balde de *tokens* permite economia. Essa propriedade permite que rajadas de até n pacotes possam ser enviadas simultaneamente, permitindo um certo volume no fluxo de saída e possibilitando uma resposta mais rápida a rajadas repentinas de entrada. O algoritmo de balde de *tokens* exclui *tokens* quando o balde enche, mas nunca descarta pacotes, diferentemente do algoritmo de balde furado, que descarta pacotes quando o balde fica cheio. O algoritmo de balde de *tokens* utiliza uma variável que basicamente conta *tokens*. O contador é incrementado em uma unidade a cada δt e é decrementado de uma unidade sempre que um pacote é enviado. Quando o contador atinge zero, nenhum pacote pode ser enviado. Ba-

sicamente o que o balde de *tokens* faz é permitir rajadas, mas até um comprimento máximo controlado.

3 Tecnologia Voz sobre IP

Voz sobre IP, ou VoIP, é a tecnologia utilizada para a realização de serviços de voz utilizando redes de pacotes IP. Esta tecnologia utiliza vários protocolos padronizados de controle e transferência de dados para a realização desses serviços, aproveitando da infraestrutura da rede internet IP para a realização dos serviços.

Para o estabelecimento de uma chamada VoIP, os dispositivos devem possuir uma pilha de protocolos específicos para a realização das chamadas. Além disso, as informações de voz provenientes do usuário do telefone VoIP necessitam ser convertidas em informações digitais por meio de codificadores específicos, para serem transmitidas para o usuário na outra extremidade da chamada.

Existem vários tipos de codificadores/decodificadores utilizados pelos terminais VoIP, de modo que a seção 3.1 será dedicada a essas ferramentas necessárias para o funcionamento do sistema VoIP. Existem vários protocolos padronizados para o estabelecimento de uma chamada VoIP. Dentre eles, podemos citar o protocolo *Session Initiation Protocol* (SIP), que é atualmente o mais utilizado. Este protocolo é encarregado do estabelecimento da sessão de voz, dados ou vídeo entre dois usuários que querem conversar, trocar mensagens ou mesmo realizarem uma vídeo conferência.

Para tal conexão, o protocolo SIP utiliza o protocolo *Session Description Protocol* (SDP), que é responsável por conter as informações pertinentes ao serviço a ser utilizado para o estabelecimento da sessão. Para o transporte dos dados, é utilizado um terceiro protocolo, o *Real time Transport Protocol* (RTP). Através do RTP as informações de voz e vídeos são transportadas até o usuário existente na ponta final da conexão. Todos esses protocolos serão descritos nas seções subsequentes.

3.1 Codificador/decodificador

Codificador é um dispositivo que converte as informações analógicas provenientes, por exemplo, de uma conversa de voz, para um formato digital. Esta conversão é necessária quando se deseja transmitir as informações analógicas através de uma rede digital, tal como a rede Internet. Do lado de recepção, o decodificador tem a função de converter a informação digital em informação analógica, para que o receptor possa utilizar a informação proveniente do transmissor.

Existem vários padrões para converter um sinal de voz analógico em um sinal digital.

A maioria das conversões utiliza o *Pulse Code Modulation* (PCM) ou variações deste. Além disso, os codificadores/decodificadores (ou *codecs*) comprimem a sequência de dados, além de, as vezes, implementarem técnicas de cancelamento de eco. A compressão da forma de onda pode poupar largura de banda. Isto é especialmente interessante em conexões de baixa velocidade para que se possa ter mais conexões ao mesmo tempo. Outra forma de economizar largura de banda é através da utilização da supressão de silêncio, quando pacotes não são enviados quando não há nenhuma voz nas conversas.

A Tabela 2 mostra os *codecs* mais conhecidos. Esta tabela também mostra algumas características relevantes destes *codecs*, tais como, tamanho da amostra, taxa de amostragem, qualidade *Mean Opinion Score* (MOS) esperada, tamanho do cabeçalho de voz, pacotes por segundo e largura de banda.

Codec	Taxa de bit (Kbps)	MOS Característico	Payload (bytes)
G.711	64	4,1	160
G.729	8	3,92	20
G.723.1	6,3	3,9	24
G.726-32	32	3,85	80
G.722	64	4,13	160

Tabela 2 – *Codecs* de voz mais utilizados e suas características (CISCO, 2006)

Além dos codecs citados acima, existem outros que são utilizados especificamente para o tráfego de voz em sistemas LTE. Estes codecs possuem especificações especialmente desenvolvidas para otimizar e se adequar melhor às características de sistemas sem fio, tais como o LTE, bem como as gerações anteriores (2G e 3G). Dentre os codecs mais utilizados atualmente para o sistema LTE, podemos citar os *codecs Adaptive Multi-Rate Wideband* (AMR-WB) (GSMA, 2013) (3GPP, 2013b) e *Enhanced Voice Services* (EVS) *coder* (IIS, 2015) (3GPP, 2014d) por exemplo. A Tabela 3 mostra algumas características desses codecs.

Codec	Taxa de bit variável (Kbps)	MOS característico	Payload (bits)
AMR-WB	23,85 a 6,60	3,25 (para taxa de 23,85 kbps) 2,00 (para taxa de 9,6 kbps)	480 (para taxa de 23,85 kbps) 192 (para taxa de 9,6 kbps)
EVS-WB	128 a 5,9	4,00 (para taxa de 24,4 kbps) 3,40 (para taxa de 9,6 kbps)	488 (para taxa de 24,4 kbps) 192 (para taxa de 9,6 kbps)

Tabela 3 – *Codecs* de voz utilizados no sistema LTE e suas características (3GPP, 2013b) (3GPP, 2014d) (IIS, 2015)

3.2 Session Initiation Protocol

SIP (RFC3261) (IETF, 2002) é um protocolo pertencente à camada de aplicação cuja função é a de estabelecer, modificar e terminar sessões de multimídia, tais como chamadas telefônicas via Internet.

O protocolo SIP pode suportar cinco etapas de estabelecimento e término de comunicação de multimídia:

- Localização do usuário: definida com a determinação do sistema final a ser usado para a comunicação.
- Disponibilidade do usuário: determina a disponibilidade do usuário de atender à chamada para estabelecimento da sessão.
- Capacidade de usuário: determina os tipos de parâmetros de mídia e tipo de mídia que pode ser usado pelo usuário.
- Estabelecimento da sessão: estabelecimento dos parâmetros da sessão de ambos os lados da chamada, tais como tipo de mídia (vídeo, áudio, etc), protocolo de transporte (RTP/UDP/IP, etc) e formato de mídia (H.261, MPEG, etc), conforme descrito na Seção 3.3.
- Gerenciamento da sessão: inclui transferência e finalização das sessões, modificação dos parâmetros da sessão e invocação de serviços.

O protocolo SIP é um componente que pode ser utilizado com outros protocolos do *Internet Engineering Task Force* (IETF) para o desenvolvimento de uma arquitetura de multimídia completa. Tipicamente, essa arquitetura pode incluir protocolos como o *Real Time Transport protocol* (RTP) (RFC 3550) (IETF, 2003) utilizado para o transporte em tempo real de dados e prover informação de qualidade de serviço (QoS), e o protocolo *Session Description Protocol* (SDP) (RFC4566) (IETF, 2006), responsável pela descrição das sessões de multimídia. Assim, o protocolo SIP deve ser usado em conjunto com outros protocolos para prover serviços completos para os usuários. Entretanto, a operação e funcionalidade básica do protocolo SIP não depende de nenhum desses protocolos.

O protocolo SIP não fornece serviços, mas primitivas que podem ser utilizadas para implementar diferentes tipos de serviços. Se essa primitiva for usada, por exemplo, para entregar uma descrição de sessão escrita através do protocolo SDP, os pontos finais podem concordar com esses parâmetros da sessão. Se a mesma primitiva é usada para entregar uma foto do chamador, bem como a descrição da sessão, um serviço de *caller ID* pode ser facilmente implementado. Como esse exemplo mostra, uma única primitiva é tipicamente usada para fornecer diferentes tipos de serviços. O protocolo SIP pode ser utilizado para iniciar uma sessão que usa algum tipo de protocolo de controle de conferência. Uma vez que as mensagens SIP e as sessões que elas estabelecem podem atravessar diferentes tipos de redes, o protocolo SIP não fornece qualquer tipo de recurso de capacidade de reserva de rede.

A natureza dos serviços fornecidos torna a segurança particularmente importante. Para esse fim, o protocolo SIP fornece um conjunto de serviços de segurança que inclui prevenção de *denial-of-service*, autenticação, proteção de integridade e serviços de encriptação e privacidade.

O protocolo SIP trabalha com ambos protocolos IPv4 e IPv6. De acordo com (MARTALIR, 2014) o SIP é um protocolo baseado em texto, similar ao *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) e *Simple Mail Transfer Protocol* (SMTP), projetado para iniciar, manter e terminação de sessões de comunicação interativa entre usuários. Tais sessões incluem voz, vídeo, chat, jogos interativos e realidade virtual.

O SIP define e utiliza os seguintes componentes:

- *User Agent Client* (UAC): Cliente no terminal que inicia a sinalização SIP,
- *User Agent Server* (UAS): Servidor no terminal que responde à sinalização SIP do UAC,
- *User Agent* (UA): Terminal de rede SIP (telefones SIP, ou porta de entrada para outras redes), que contém UAC e UAS,
- *Proxy Server*: Recebe pedidos de ligação do UA e transfere-os para outro servidor proxy se a estação especial não está na sua administração,
- *Redirect Server*: Recebe pedidos de ligação e os envia de volta para o solicitante, incluindo dados de destino, em vez de enviá-los para o chamador,
- *Location Server*: recebe pedidos de registro da UA e atualiza o banco de dados do terminal com eles.

A Tabela 4 mostra as mensagens básicas enviadas no ambiente SIP:

Nome	Descrição
<i>INVITE</i>	Mensagem responsável por convidar um dispositivo para uma sessão de dados, vídeo ou voz
<i>ANSWER</i>	Mensagem responsável pela aceitação do convite
<i>BYE</i>	Mensagem responsável pela finalização da sessão multimídia
<i>CANCEL</i>	Mensagem responsável pela rescisão de conexão não estabelecida
<i>REGISTER</i>	Mensagem responsável pelo registro dos dispositivos SIP em um servidor de registro ou SIP <i>Server</i>

Tabela 4 – Mensagens enviadas através do protocolo SIP.

Respostas às mensagens SIP estão no formato digital, como no protocolo http. A Tabela 5 mostra as mais importantes:

Tipo	Nome	Descrição
1xx	<i>Provisional</i>	Recebida, continuando o processo da requisição
2xx	<i>Success</i>	A ação foi recebida com sucesso, entendida e aceita
3xx	<i>Redirection</i>	Outras medidas precisam ser tomadas de modo a completar a requisição
4xx	<i>Client Error</i>	A requisição contém erro na sintaxe ou não pode ser preenchida neste servidor
5xx	<i>Server Error</i>	Servidor falhou em preencher uma requisição aparentemente válida
6xx	<i>Global Failure</i>	A requisição não pode ser preenchida em nenhum servidor

Tabela 5 – Mensagens de respostas do protocolo SIP.

3.3 Session Description Protocol

O protocolo *Session Description Protocol* (SDP) fornece um padrão de requisitos para prover detalhes de mídia, endereço de transporte, além de outros dados de descrição de sessão aos participantes, independentemente de como essa informação é transportada. O protocolo SDP é puramente um formato para descrição de uma sessão, podendo ser utilizado com outros protocolos de estabelecimento de sessão como, por exemplo, o SIP. Este protocolo foi desenvolvido para ser um protocolo de propósito geral, que pode ser usado em vasta gama de ambientes e aplicações de rede. Entretanto, este não suporta conteúdos de negociação ou codificação de mídia.

O protocolo SDP tem o propósito de transmitir informações sobre *streaming* de mídia em sessões de multimídia permitindo a participação dos receptores das sessões de descrição em uma sessão multimídia. O protocolo SDP é destinado principalmente para uso em um conjunto de redes, embora este seja suficientemente genérico de tal forma que pode descrever conferências em outros ambientes de rede.

Primeiramente este protocolo pode oferecer um meio para comunicar a existência de uma sessão, além disso, o SDP pode ser um meio para transmitir informações suficientes que permitam ao usuário aderir e participar da sessão.

O protocolo SDP inclui as seguintes informações a respeito da mídia:

- O tipo de mídia (vídeo, áudio, etc),
- O protocolo de transporte (RTP/UDP/IP, etc),
- O formato da mídia (H.261 vídeo, MPEG vídeo, etc).

Adicionalmente ao formato de mídia e do protocolo de transporte, o protocolo SDP transmite também detalhes de endereço e porta. Para uma sessão de *multicast* IP, este protocolo inclui:

- O endereço do grupo de *multicast* para a mídia,
- A porta de transporte para a mídia.

Este endereço corresponde ao endereço de destino e a porta corresponde à porta de destino do *stream multicast*, não importando se este for enviado, recebido ou ambos.

Para sessões IP *unicast*, são inclusos no protocolo:

- O endereço remoto da mídia,
- A porta de transporte remota da mídia.

A semântica deste endereço e da porta depende da mídia e do protocolo de transporte definido. Por padrão, este deve ser o endereço remoto de controle e porta remota pela qual os dados são enviados. Alguns tipos de mídia podem redefinir esse comportamento, mas isso não é recomendado, pois pode tornar as implementações mais complexas.

3.4 *Real time Transport Protocol*

O protocolo *Real time Transport Protocol* (RTP) é um protocolo que fornece serviços de entrega de dados fim a fim com características de tempo real, tais como áudio e vídeo interativos. Estes serviços incluem cabeçalho de tipo de identificação, sequência de numeração, *timestamping* e monitoração de entrega. As aplicações tipicamente utilizam o RTP em cima do protocolo UDP, aproveitando as suas características de serviços de multiplexação e *checksum*.

O protocolo RTP sozinho não fornece um mecanismo de garantia de entrega ou outras garantias de qualidade de serviço, mas pode utilizar outros serviços de camadas abaixo para garantir a entrega. Ele por si não previne entregas de pacotes fora de ordem, nem assume que a rede utilizada é confiável. A numeração de sequência inclusas no protocolo RTP permite que o receptor reconstrua a sequência de pacotes do transmissor, mas essa sequência numérica pode também ser usada para determinar a localização correta de um pacote.

O protocolo RTP é constituído de duas partes:

- O protocolo RTP propriamente dito, que é responsável por transportar dados que possuem características e propriedades de tempo-real.

- O protocolo RTCP (*RTP Control Protocol*), que é responsável por obter informações de monitoração da qualidade de serviço, fornecendo também informações sobre os participantes de uma sessão em andamento.

O protocolo RTP é maleável de modo a fornecer a informação necessária por uma aplicação em particular, podendo ser integrado no processamento da aplicação, em vez de ser desenvolvido em uma camada separada.

3.5 Exemplo de estabelecimento de uma sessão SIP

A Figura 8 mostra um fluxo de sinalização de processo de estabelecimento de uma sessão SIP entre dois usuários.

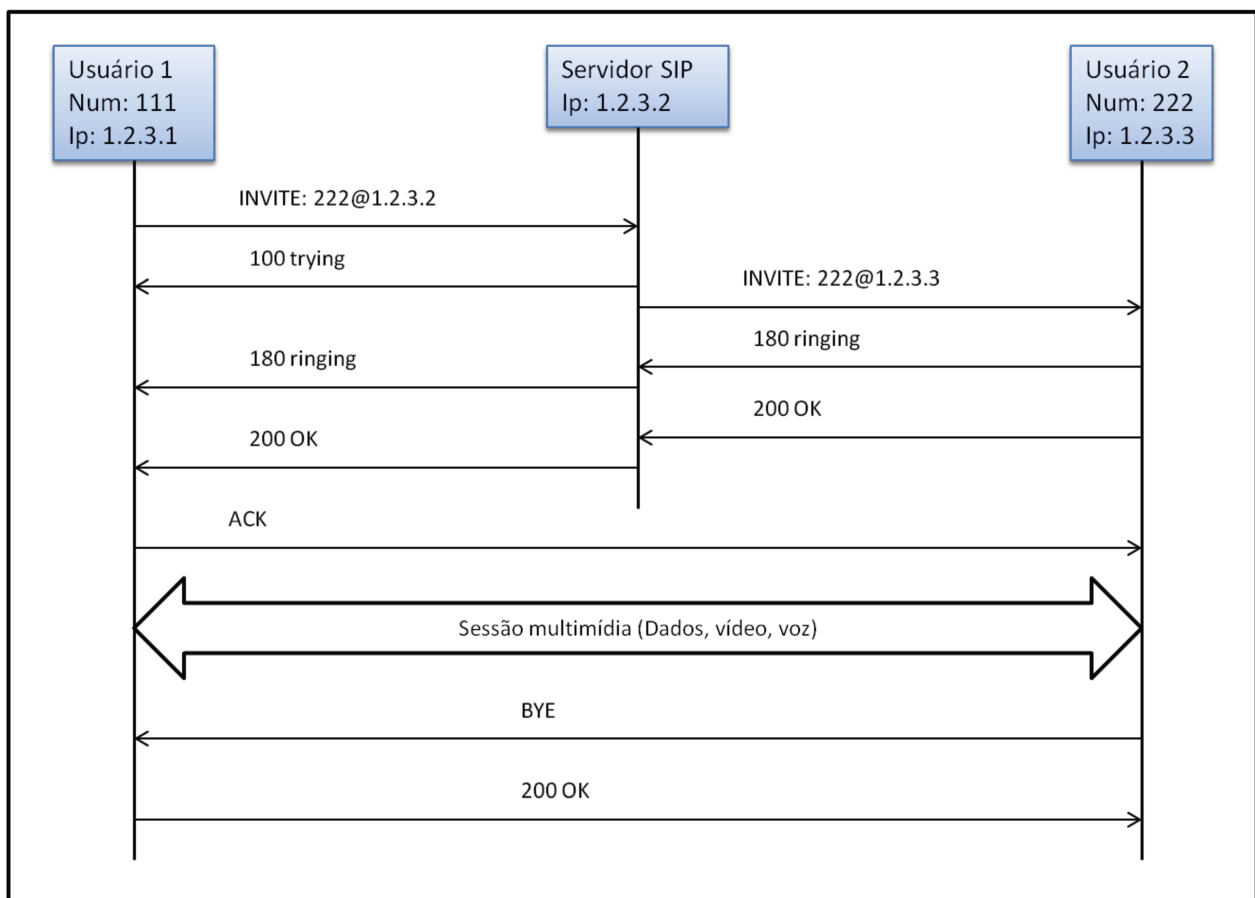


Figura 8 – Exemplo de estabelecimento e término de uma sessão multimídia utilizando o protocolo SIP.

No exemplo da Figura 8, o usuário 1 (111) deseja estabelecer uma sessão de áudio com o usuário 2 (222). Assume-se que os dois usuários estão registrados no servidor SIP

(1.2.3.2). O usuário 1 envia ao servidor SIP uma mensagem SIP *INVITE*, contendo o codec a ser utilizado na mensagem SDP.

A Tabela 6 mostra um exemplo de mensagem *INVITE*, com a respectiva informação SDP.

<i>INVITE</i>	sip: 2221.2.3.1:5060 SIP/2.0 From: sip:111@1.2.3.1 To: sip:222@1.2.3.1 v=0 o=CiscoSystemsSIP-GW-UserAgent 7181 811 IN IP4 1.2.3.1 s=SIP Call c=IN IP4 1.2.3.1 t=0 0 m=audio 18990 RT SIP-CME#P/AVP 0 19 c=IN IP4 1.2.3.1 a=rtpmap:0 PCMU/8000 a=rtpmap:19 CN/8000 a=ptime:20
---------------	---

Tabela 6 – exemplo de mensagem *INVITE* com a respectiva informação SDP

O servidor SIP, por sua vez, reencaminha a mensagem SIP para o destinatário Usuário 2 no endereço IP 1.2.3.3. Da mesma forma, o servidor SIP envia uma mensagem '100 *trying*' para o usuário 1, informando a tentativa de contactar o usuário 2.

O usuário 2, ao receber a mensagem *INVITE* do servidor SIP, inicia o tom de chamada e envia a mensagem '180 *ringing*' para o servidor SIP, informando que este recebeu o invite e iniciou o tom de alerta de recebimento de chamada. O servidor SIP reencaminha a mensagem '180 *ringing*' para o usuário 1, informando que o *INVITE* chegou ao destino e que o usuário 2 iniciou o tom de alerta de recebimento de chamada.

O usuário 2, então, atende a chamada e envia a mensagem '200 ok' para o servidor SIP. O servidor SIP reencaminha o '200 ok' para o usuário 1, informando que o usuário 2 atendeu a chamada.

O usuário 1 envia diretamente a mensagem ACK para o usuário 2, iniciando, logo em seguida, a sessão RTP entre ele e o usuário 2. Neste ponto, o servidor SIP não atua mais, de modo a existir apenas conexão entre os dois usuários pertencentes à sessão.

Os pacotes RTP, contendo os dados da sessão, são enviados bidirecionalmente e os pacotes RTCP, contendo informações de controle da sessão, são enviados em intervalos de tempo pré-definidos.

4 Métodos e ferramentas para a medição da qualidade de voz

Dentre as várias metodologias utilizadas para medição da qualidade de voz (MARINO, 2007), a utilizada para os testes de desempenho de voz descrito nesse trabalho foi aquela baseada no *Mean Opinion Score* (MOS). Esta metodologia é descrita pelas recomendações ITU-T P.800 (ITU-T, 1996) e P.800.1 (ITU-T, 2006). A primeira recomendação descreve os métodos e procedimentos para a realização de avaliações subjetivas de qualidade da transmissão. Já a segunda fornece uma terminologia utilizada em conjunto com expressões de qualidade de voz em termos de MOS.

Além do MOS, os valores dos parâmetros latência e *jitter* também foram utilizados para a medição da qualidade das chamadas VoIP. Estes parâmetros são utilizados neste trabalho para verificar a qualidade de voz a trafegar pela rede LTE.

4.1 latência e *Jitter*

A latência, ou atraso em uma direção, é um fator chave para determinar a qualidade da chamada VoIP. Esta variável consiste no tempo decorrido desde o envio do pacote pelo emissor até o recebimento pelo receptor, para o nosso caso, a latência consiste no tempo de atraso de conversação entre dois usuários VoIP.

O *Jitter* é uma variação estatística do atraso na entrega de dados em uma rede, ou seja, pode ser definida como a medida de variação do atraso entre os pacotes sucessivos de dados. Observa-se ainda que uma variação de atraso elevada produz uma recepção não regular dos pacotes.

Quando um datagrama é enviado (IXIA, 2011), o remetente lhe dá um *timestamp*. Quando é recebido, o receptor acrescenta outro *timestamp*. Estas duas marcas de tempo são utilizadas para calcular o tempo de trânsito de datagrama. Se os tempos de trânsito para datagramas dentro do mesmo teste são diferentes, o teste contém tremulação.

Em um aplicativo de vídeo, ela se manifesta como uma tremura da imagem. Durante uma chamada telefônica, o seu efeito pode ser similar ao efeito de perda de pacotes e algumas palavras podem ser perdidas ou serem ininteligíveis.

4.2 Mean Opinion Score

Mean Opinion Score (MOS) é um método subjetivo de medida de qualidade de voz, largamente utilizado para avaliar a qualidade de sistemas telefônicos. A qualidade da voz transmitida por um dispositivo e recebida por outro é avaliada de acordo com um algoritmo que pontua essa qualidade de acordo com uma escala de 1 até 5, sendo o valor 1 correspondente a 'Ruim' e o valor 5 correspondente a 'Excelente'.

O MOS pode ser utilizado em conjunto com identificadores com o objetivo de distinguir a área de aplicação em que o método pode ser utilizado. A Tabela 7 mostra exemplos de identificadores que podem ser utilizados com o MOS.

	Apenas ouvindo	Conversacional	Falante
Subjetivo	MOS-LQSy	MOS-CQSy	MOS-TQSy
Objetivo	MOS-LQOy	MOS-CQOy	MOS-TQOy
Estimado	MOS-LQEy	MOS-CQEy	MOS-TQEy

Tabela 7 – Exemplos de identificadores utilizados com MOS.

As letras N, W e M presentes na Tabela 7, são descritores da variável 'y' e se referem a pontuações de MOS referentes a aplicações que utilizam banda-estreita (*narrow-band*), banda-larga (*wide-band*) ou ambas, respectivamente. Assim, resumidamente, o identificador:

- N (por exemplo MOS-LQON) é utilizado para identificar pontuações de MOS obtidas para aplicações de voz em banda-estreita (faixa de 300 a 3400 Hz), relativas à referência de qualidade de banda-estreita. Esta instrução é aplicável a testes subjetivos de banda-estreita ou para a recomendação de pontuação P.862.1 (ITU-T, 2003);
- W (por exemplo MOS-LQOW) é utilizado para identificar pontuações MOS obtidas para aplicações de voz em banda-larga (faixa de 50 a 7000 Hz), relativas à referência de qualidade de banda-larga. Esta instrução é aplicável para testes subjetivos de banda-larga ou para a recomendação de pontuação P.862.2 (ITU-T, 2007b);
- M (por exemplo MOS-LQOM) é utilizado para identificar pontuações MOS obtidas para aplicações de voz em banda estreita ou larga, relativas à referência de qualidade de banda larga em um contexto de larguras de banda mistas. O identificador 'M' é aplicável para testes subjetivos de largura de banda mista.

As variáveis LQ e CQ presentes na Tabela 7 se referem à qualidade de audição (*Listening Quality*) e qualidade de conversação respectivamente. As variáveis 'S', 'O' e 'E' indicam se o método MOS é do tipo subjetivo, objetivo ou estimado respectivamente.

Dentre os identificadores mostrados na tabela, utilizados em conjunto com o MOS, os identificadores utilizados por esse trabalho correspondem àquele relacionado com as situações de conversação (MOS-CQE) e àquele relacionado com as situações de escuta apenas (MOS-LQO).

No identificador MOS-CQE a pontuação é calculada pelo modelo de planejamento de rede, com o objetivo de prever a qualidade da aplicação em uma situação de conversação.

Estimativas de qualidade de conversação neste caso são regidas de acordo com a recomendação ITU-T G.107 (ITU-T, 2011). A Tabela 8 mostra os valores referentes à pontuação MOS utilizada na classificação da qualidade das chamadas.

Limite Inferior	Satisfação do usuário
4,34	Muito satisfeito
4,03	Satisfeito
3,60	Alguns usuários insatisfeitos
3,10	Muitos usuários insatisfeitos
2,58	Quase todos os usuários insatisfeitos

Tabela 8 – Pontuação MOS.

Já no identificador MOS-LQO, a medição é realizada por meio de um modelo objetivo que visa prever a qualidade para uma situação somente de teste de escuta.

Medidas objetivas feitas utilizando os modelos presentes nas recomendações ITU-T P.862.1 (ITU-T, 2003) e P.862.2 (ITU-T, 2007a) mostram resultados em termos de MOS-LQO.

Deve-se notar que os métodos recomendados pelo ITU-T através das recomendações P.862.1 e P.862.2 são validados entre interfaces elétricas apenas.

4.3 *Perceptual evaluation of speech quality*

Perceptual evaluation of speech quality (PESQ) (ITU-T, 2003) (ITU-T, 2007a) é um *software* padronizado pelo ITU-T, por meio da recomendação P.862, para medidas de qualidade de voz. Esta ferramenta é utilizada durante a instalação, comissionamento e solução de problemas em dispositivos de telefonia. A ferramenta PESQ é instalada em equipamentos de teste, mas também pode ser integrada em roteadores, centrais telefônicas, “*voice quality enhancers*” e outros dispositivos de rede.

Dentre as características da ferramenta PESQ, podemos citar:

- Permite medidas de qualidade de ‘Audição’ em aplicações;
- Qualidade de predição acurada em uma grande variedade de aplicações;

- Realiza teste de conversação artificial estimulada (ASTS).

PESQ faz medições de qualidade de voz ponto a ponto, em um único sentido, e é designado para ser usado com testes de intrusão. Um sinal é passado através do sistema a ser testado e a saída degradada é comparada com o sinal de referência da entrada. A Figura 9 mostra em blocos o algoritmo PESQ.

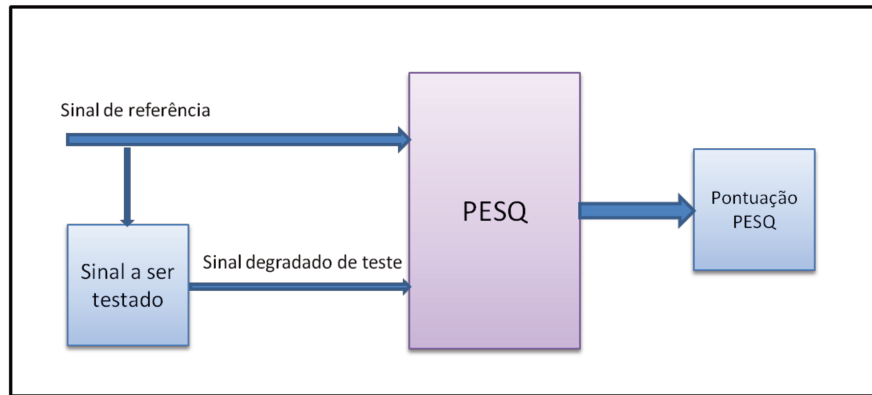


Figura 9 – Algoritmo PESQ.

Os sinais de teste devem ser de voz, pois muitos sistemas são otimizados para este tipo de sinal e respondem erroneamente para sinais diferentes. O ASTS é especificamente projetado para medição de sinais de voz, sendo os arquivos a serem testados amostrados a 8 kHz ou 16kHz. Na Figura 10, tem-se o diagrama em blocos de processamento realizado pelo PESQ.

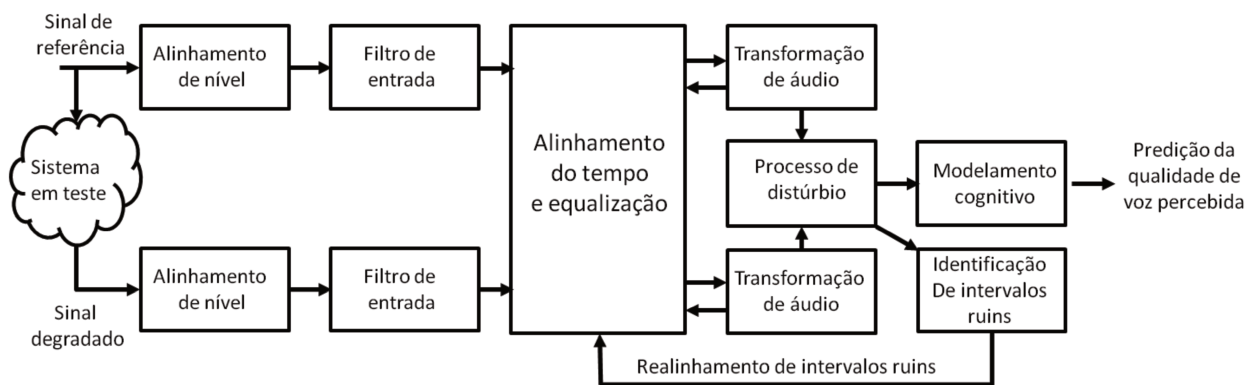


Figura 10 – Estrutura do PESQ.(PSYTECHNICS, 2001)

O modelo inclui os seguintes estágios:

1. *Level Alignment* (Alinhamento de volume): Para comparar os sinais, o sinal de voz de referência e o sinal degradado são alinhados para o mesmo nível de potência. Isto corresponde ao nível de escuta normal nos testes subjetivos.

2. *Input Filtering* (Filtro de entrada): Faz a compensação dos filtros encontrados nos aparelhos telefônicos e rede.
3. *Time Alignment* (Alinhamento do tempo): Caso o sistema inclua um atraso que pode ser variável, o algoritmo mede e compensa este atraso.
4. *Auditory Transform* (Transformação de áudio): O sinal de referência e o sinal de degradação passam por uma transformação que tenta imitar as propriedades do ouvido humano.
5. *Disturbance processing* (processo de distúrbio): Os parâmetros de distúrbio são calculados usando médias não lineares sobre áreas específicas da superfície do erro.

Os parâmetros de distúrbio são convertidos para uma pontuação PESQ que têm uma faixa de 1 até 4.5. Além disso, utiliza-se uma função para converter estes parâmetros para a escala P.800 MOS.

4.4 IxChariot

IxChariot (IXIA, 2011) é uma ferramenta de avaliação de rede para a solução de problemas e pré-avaliação de redes e aplicações. Esta ferramenta simula aplicações do mundo real para prever o desempenho de dispositivos, sistemas e redes através de condições realistas de tráfego. A ferramenta IxChariot é formada pelos seguintes dispositivos:

- Um servidor ou console, onde os testes de desempenhos são configurados. Após a coleta dos dados, os mesmos são analisados e é gerado um relatório de desempenho.
- Pontos de terminação de desempenho (*Performance Endpoints*), distribuídos entre os dispositivos normalmente localizados em pontos estratégicos do ambiente a ser testado. Estes pontos são responsáveis por iniciar o tráfego de voz entre os dispositivos, coleta das medições relativas à qualidade de voz durante o tráfego de voz entre os dispositivos e, finalmente, responsáveis pelo envio de dados para o servidor ou console.

Sendo assim, existem três elementos que devem estar presentes em um ambiente de testes que utilize o IxChariot:

- IxChariot Console: uma máquina com sistema operacional Windows com o *software* IxChariot instalado. O IxChariot fornece todas as ferramentas necessárias para definir e executar os testes de desempenho.

- Dispositivo com o ponto de terminação 1 (*Performance Endpoint 1*): este dispositivo se comunica diretamente com o IxChariot console e também com o ponto de terminação 2, localizado em outro dispositivo. O ponto de terminação 1: a) recebe os *scripts* de teste e os dados provenientes do console IxChariot; b) coordena as ações do teste com o ponto de terminação 2; c) executa as instruções de teste; d) retorna todos os resultados dos testes para o console IxChariot.
- Dispositivo com o ponto de terminação 2 (*Performance Endpoint 2*): este dispositivo se comunica apenas com o dispositivo que contém o *endpoint* 1. Ele recebe os scripts de teste e os dados do endpoint 1 e retorna para este dispositivo os resultados dos testes realizados.

A Figura 11 mostra um ambiente de teste básico utilizando os componentes da ferramenta IxChariot contendo o console IxChariot e os pontos de terminação 1 e 2 necessários para a realização dos testes de desempenho.

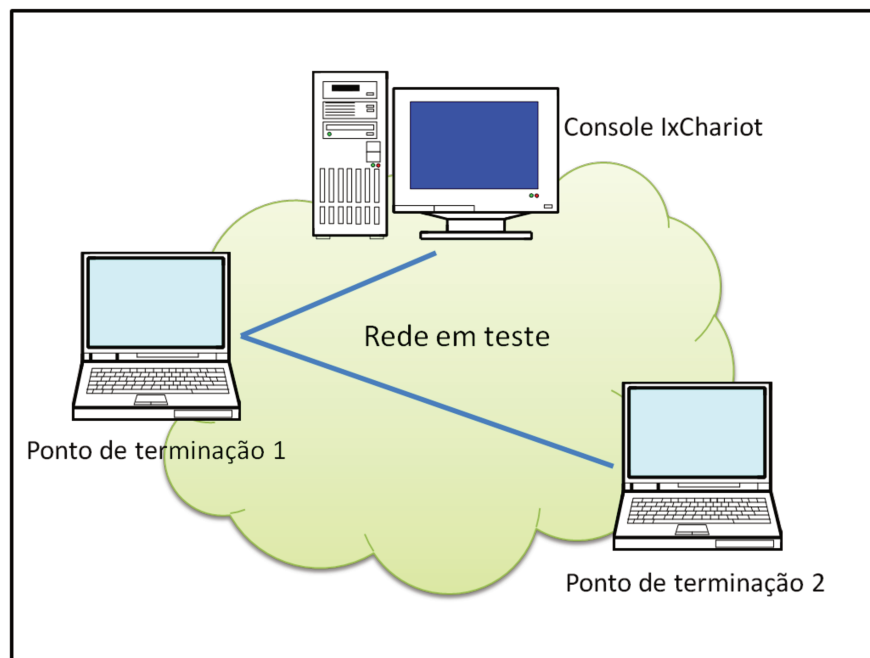


Figura 11 – Teste básico utilizando a ferramenta IxChariot.

Um ambiente de teste utilizando o IxChariot suporta dois tipos de tráfego:

- Tráfego de configuração do teste e resultados: este é o tráfego de gerenciamento transmitido entre o Console IxChariot e o computador contendo o ponto de terminação 1;

- Tráfego de Dados: este é o tráfego de teste transmitido entre os dois pontos de terminação durante a execução dos testes.

4.5 Ferramenta de geração de tráfego - IPERF

IPERF (IPERF, 2014) é uma ferramenta originalmente desenvolvida pelo projeto NLANR/DAST (MCGREGOR, 2014), e agora suportado pelo *Google Project* (CODE, 2014), utilizada para medições de desempenho em tráfegos TCP e UDP, tais como largura de banda intermediária, valores de *jitter* e perda de dados.

Para geração de tráfego TCP esta ferramenta possui os seguintes recursos:

- Medida de largura de banda.
- Relatório de tamanho da Máxima Unidade de Transmissão (MTU) e tamanho de leituras observadas.
- Suporte de largura de janelas TCP via *socket buffers*.
- Recurso de *multi-thread* (múltiplos processos de execução de aplicativos), se as classes *pthread* ou *win32 thread*, encontradas na biblioteca de desenvolvimento de sistemas operacionais baseados em linux ou Windows, respectivamente, estiverem disponíveis. Tanto o cliente quanto o servidor pode ter múltiplas conexões simultâneas.

Já para gerar tráfego UDP esta ferramenta tem como recursos:

- O cliente pode criar fluxos de pacotes UDP com larguras de banda específicas.
- Medida de perda de pacotes.
- Medidas de *jitter* de atraso.
- Capacidade de *multicast*.
- Recurso *multi-thread* se a classe *pthread* estiver disponível. Tanto o cliente quanto o servidor pode ter múltiplas conexões simultâneas.

5 Ambiente de Testes

Para verificar o comportamento das chamadas VoIP na rede LTE em um ambiente formado por equipamentos do mundo real, foi montada a configuração mostrada na Figura 12.

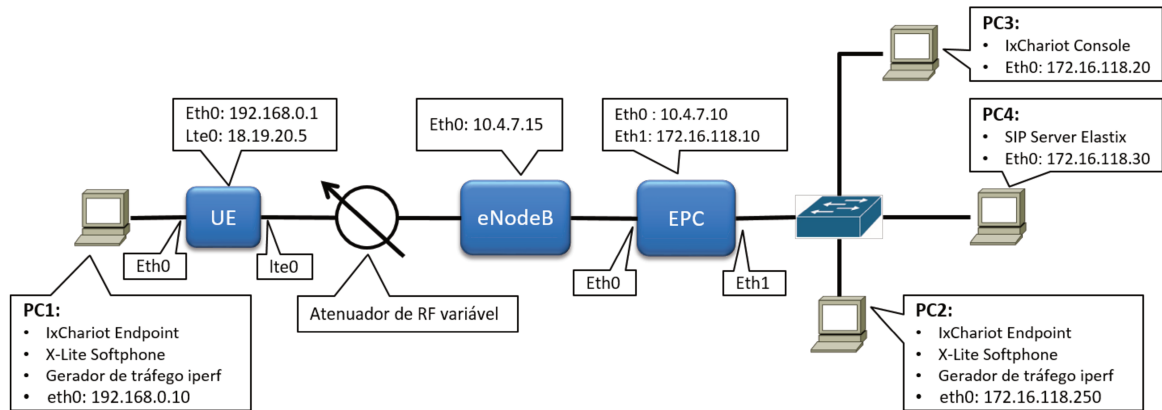


Figura 12 – Cenário utilizado para os testes de voz.

A topologia dos testes consiste de dois computadores pessoais (PC), que hospedam os pontos de terminação monitorados pela ferramenta de testes IxChariot. Esses pontos de terminação são responsáveis pelo envio do tráfego RTP. O ponto de terminação 1 (PC2) e o ponto de terminação 2 (PC1) são referentes à EPC e ao terminal UE, respectivamente. O PC1 e PC2 também hospedam a ferramenta iperf para geração tráfego concorrente com ou sem gargalo.

O PC1 recebe o endereço ip 192.168.0.10 por meio da interface eth0 (com ip estático: 192.168.0.1) via dhcp server. O PC2 por sua vez é configurado estaticamente com o ip: 172.16.118.250. O terminal UE recebe o ip: 18.19.20.5 da interface lte0, via dhcp server encontrado na EPC, quando este se conecta com a eNodeB e, deste modo, os fluxos de serviço padrão e dedicado são também criados. A eNodeB possui o ip estático 10.4.7.15 e a EPC possui os ips das interfaces eth0: 10.4.7.10 e eth1: 172.16.118.10, definidos também estaticamente. O PC3, contendo a ferramenta IxChariot, e PC4, contendo o servidor SIP Elastix, são configurados com ips 172.16.118.20 e 172.16.118.30 respectivamente.

Os computadores PC1 e PC2 possuem instalados o aplicativo X-lite (COUNTER-PATH, 2015), softphone responsável por gerar e receber chamadas de voz entre os usuários. Diferentemente da ferramenta IxChariot, que simula o tráfego de voz entre os usuários que possuem os endpoints, o X-lite é um telefone SIP que faz chamadas reais VoIP entre os usuários através da rede LTE.

No lado da rede onde está conectada a EPC, também se encontra o PC3 que hospeda a ferramenta IxChariot utilizada para a geração do tráfego de voz e o PC4 que hospeda o servidor SIP server (Elastix) (SOLUTIONS, 2015) responsável pela conexão das chamadas VoIP quando o aplicativo X-lite é utilizado.

O PC3 com IxChariot também é responsável por coletar as medições dos dados de desempenho e medidas de MOS. Neste lado da rede também se encontra a eNodeB, que se intercomunica com o terminal UE.

Os testes de desempenho do tráfego de voz foram realizados considerando alguns cenários de testes caracterizados a partir da configuração de determinados parâmetros pertencentes aos dispositivos que constituem a rede LTE. Além disso, para testes, a interferência externa foi mantida sob controle através da ligação da eNodeB para o terminal UE realizada através de um cabo de RF com um atenuador variável, o que permitiu variar a relação sinal-ruído (SNR) das conexões para imitar as mudanças no terminal UE ao longo da célula de alcance da eNodeB.

Para verificar o comportamento da priorização do tráfego de voz em um ambiente real de utilização de uma rede LTE, no qual vários terminais UE compartilham a mesma célula de uma eNodeB, o ideal seria realizar chamadas de voz utilizando vários terminais em uma rede de testes. Por motivos de limitação de equipamentos, foi utilizado somente um terminal UE.

Nos testes realizados, foram considerados a faixa de frequência de 450-470 MHz (3GPP, 2013a), a largura de banda de 5 MHz de operação e diferentes esquemas de modulação utilizando 25 blocos de recursos físicos.

Para os testes realizados foram criados dois fluxos de serviço na EPC: um fluxo de serviço padrão para o tráfego concorrente e um fluxo de serviço dedicado para o tráfego de voz. Os fluxos de serviço foram criados através da ferramenta de configuração da EPC, levando-se em conta alguns parâmetros utilizados pela arquitetura LTE.

Neste trabalho, dentre todos parâmetros usados para configurar os fluxos de serviço utilizados no um sistema LTE, foram configurados apenas aqueles que, de maneira geral, influenciaram diretamente o desempenho de chamadas de voz na rede LTE 450 MHz, tais como: QCI configurado para os fluxos de serviço de modo a priorizar o tráfego de voz em relação ao tráfego concorrente de dados. TFT, utilizado para assegurar que o fluxo de voz utilizasse somente o fluxo de serviço dedicado. Os parâmetros GBR e MBR, utilizados para garantir a taxa de dados e limitar a máxima taxa utilizada pelo fluxo de serviço dedicado respectivamente. Um PDN contendo um APN de criados e responsáveis pela criação e manutenção dos fluxos de serviços utilizados no sistema. Outros parâmetros importantes configurados foram

o APN-AMBR, máxima taxa utilizada pelo APN e o UE-AMBR que consiste na taxa total utilizada por todos os APNs existentes na rede LTE. Tanto o APN-AMBR e UE-AMBR são relacionados ao fluxo de serviço padrão. Para o caso desse trabalho, devido a utilizarmos apenas um APN, os valores de APN-AMBR e UE-AMBR foram configurados com os mesmos valores.

Os demais parâmetros foram configurados com os valores padrão por não influenciarem diretamente o desempenho das chamadas de voz, mas são igualmente importantes para o funcionamento do sistema LTE de maneira geral. Todos esses parâmetros são descritos na seção 2.3.2.

Para garantir que o tráfego de pacotes VoIP passasse pelo fluxo de serviço dedicado, foi criado um filtro *Traffic Flow Template* (TFT) para esse fluxo de serviço com as configurações necessárias, conforme mostrado na Tabela 11. Nesse filtro, nomeado de RTP, foi configurado o protocolo *User Datagram Protocol* (UDP), bem como as portas de origem e destino, de acordo com as portas utilizadas pela ferramenta IxChariot para tráfego de voz.

A configuração dos parâmetros utilizados nesse trabalho são descritos nas Tabelas 9 e 10 para o fluxo de serviço padrão e dedicado, respectivamente.

Parâmetros	sub-parâmetros	Valores utilizados
QCI		9
ARP	<i>Priority</i>	1
APN-MBR/UE-AMBR	<i>Uplink</i>	10240 kbps
	<i>Downlink</i>	10240 Kbps

Tabela 9 – Parâmetros usados na criação do fluxo de serviço padrão.

Parâmetros	sub-parâmetros	Valores utilizados
QCI		1/7
ARP	<i>Priority</i>	2
MBR/GBR	<i>Uplink</i>	2000 kbps
	<i>Downlink</i>	2000 kbps

Tabela 10 – Parâmetros usados na criação do serviço dedicado.

Filtro	Valores utilizados
Nome	RTP
Protocolo	17 (UDP)
Porta de Origem	15000 - 65535
Porta de Destino	15000 - 65535

Tabela 11 – Filtro TFT do fluxo de serviço dedicado.

De acordo com a Tabela 9, o QCI 9 foi configurado para o fluxo de serviço padrão para possibilitar tráfego de dados que não necessitam de garantia de taxa e nem prioridade já que os parâmetros relacionados a esse QCI não priorizam e nem garantem taxa de bits (vide Tabela 1).

O fluxo de serviço dedicado, por sua vez, foi configurado de modo não simultâneo, com os QCIs 1 e 7. O QCI de valor 1 é utilizado para fornecer qualidade de serviço e garantia de taxa para serviços de voz. O QCI = 7 é utilizado para serviços de voz, vídeo, live streaming e jogos interativos, mas com características de não garantia de taxa e também possuir uma prioridade menor do que a prioridade quando QCI = 1 é utilizado, mas maior do que a prioridade utilizada pelo QCI = 9, conforme mostrado Tabela 1.

A utilização dos QCIs, com ou sem garantia de taxa e prioridades distintas, no fluxo de serviço dedicado foi necess'ario para verificar o comportamento do escalonador com a existência ou não da garantia de taxa, bem como mediante diferentes prioridades configuradas, sempre com um tráfego concorrente em paralelo passando pelo fluxo de serviço padrão.

As chamadas de voz foram configuradas e executadas através da utilização da ferramenta IxChariot, criando-se vários pares de *endpoints* (vide capítulo 4.4) utilizados pelo IxChariot que, dependendo do cenário utilizado, podiam ser fixos ou variáveis num total de 20. A Figura 13 mostra vários pares de chamadas VoIP configuradas na ferramenta IxChariot, e a Figura 14 mostra um exemplo de configuração de um par VoIP através do menu específico para esta configuração.

Test Setup		Throughput	VoIP	One-Way Delay	Lost Data	Jitter	Raw Data Totals		Endpoint Configuration		Datagram			
Group	Pair Group Name	Run Status	Timing Records Completed	MOS Average	MOS Minimum	MOS Maximum	R-value Average	One-Way Delay Average (ms)	End-to-End Delay Average (ms)	RFC 1889 Jitter Average (ms)	Percent Bytes Lost E1 to E2	Maximum Consecut- Lost Datagra		
<div><div><div></div><div></div><div></div></div><div>g711</div></div>	Pair 1 g711	Finished	1.000	4.14	2.03	4.37	84.63	74	135	4.518	0.001			
	Pair 2 g711	Finished	50	4.18	2.91	4.37	85.73	74	135	4.480	0.000			
	Pair 3 g711	Finished	50	4.13	2.22	4.36	84.38	73	134	4.660	0.013			
	Pair 4 g711	Finished	50	4.15	3.15	4.36	84.65	73	134	4.500	0.000			
	Pair 5 g711	Finished	50	4.17	3.15	4.36	85.30	74	135	4.460	0.000			
	Pair 6 g711	Finished	50	4.16	3.14	4.37	84.91	75	136	4.440	0.000			
	Pair 7 g711	Finished	50	4.15	2.90	4.36	84.74	73	134	4.400	0.000			
	Pair 8 g711	Finished	50	4.14	2.48	4.37	84.40	75	136	4.520	0.000			
	Pair 9 g711	Finished	50	4.14	2.92	4.37	84.66	75	136	4.500	0.000			
	Pair 10 g711	Finished	50	4.12	2.22	4.37	83.95	76	137	4.480	0.000			
	Pair 11 g711	Finished	50	4.12	2.03	4.37	83.98	75	136	4.720	0.013			
	Pair 12 g711	Finished	50	4.14	2.49	4.37	84.54	74	135	4.480	0.000			
	Pair 13 g711	Finished	50	4.17	2.92	4.37	85.40	74	135	4.480	0.000			
	Pair 14 g711	Finished	50	4.13	2.48	4.37	84.40	75	136	4.500	0.000			
	Pair 15 g711	Finished	50	4.18	3.14	4.37	85.59	75	136	4.340	0.000			
	Pair 16 g711	Finished	50	4.14	2.22	4.37	84.68	74	135	4.700	0.000			
	Pair 17 g711	Finished	50	4.13	2.90	4.37	84.40	73	134	4.620	0.000			
	Pair 18 g711	Finished	50	4.11	2.92	4.37	83.77	74	135	4.420	0.000			
	Pair 19 g711	Finished	50	4.14	2.91	4.36	84.74	73	134	4.660	0.000			
	Pair 20 g711	Finished	50	4.16	2.91	4.37	85.05	74	135	4.620	0.000			
		Pair 20 g711	Finished	50	4.10	2.93	4.37	83.34	74	135	4.380	0.000		

Figura 13 – Exemplo de criação de 20 pares correspondentes a 20 chamadas VoIP.

O par de *endpoints* foi criado levando-se em consideração os endereços dos PCs com endpoint 1 e 2, a qualidade de serviço para esse par e finalmente o codec a ser utilizado pela chamada VoIP. O tráfego concorrente foi gerado através da ferramenta iperf, criando-se um tráfego TCP bidirecional, entre o PC1 e PC2, conectados na rede do lado da EPC e no terminal UE respectivamente. Para isto utilizou-se os comandos da ferramenta IPERF mostrado na Tabela 12.

Conforme mostrado na Tabela 12, para configurar o tráfego para a direção de *downlink*

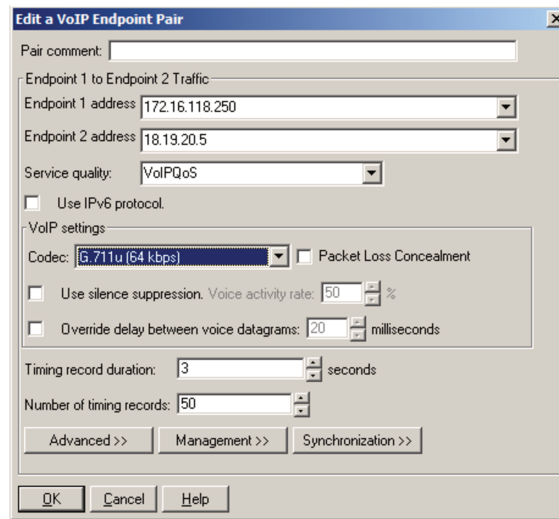


Figura 14 – Exemplo de configuração de um par VoIP utilizando o IxChariot.

Direção	Tipo de Tráfego	Sintaxe do comando	Dispositivo
<i>downlink</i>	TCP	iperf.exe -c 18.19.20.5 -t9999 -P5 -i1 iperf.exe -s -i1	PC2 (172.16.118.250) PC1 (18.19.20.5)
<i>uplink</i>	TCP	iperf.exe -c 172.16.118.250 -t9999 -P5 -i1 iperf.exe -s -i1	PC1 (18.19.20.5) PC2 (172.16.118.250)

Tabela 12 – Sintaxe da ferramenta iperf.

(PC2 para PC1), o iperf foi configurado como cliente (-c) no PC2 (172.16.118.250) para gerar 5 fluxos de tráfego TCP em paralelo (-P5) para o PC1 (18.19.20.5), atualizando o console no intervalo de 1 segundo (-i1). Já no PC1 (18.19.20.5) o iperf foi configurado como servidor (-s) para receber tráfego TCP do PC2 (172.16.118.250), atualizando o console no intervalo de 1 segundo (-i1). Para configurar o tráfego para a direção de *uplink* (PC1 para PC2), o iperf foi configurado como cliente (-c) no PC1 (18.19.20.5) para gerar 5 fluxos de tráfego TCP em paralelo (-P5) para o PC2 (172.16.118.250), atualizando o console no intervalo de 1 segundo (-i1). Da mesma forma, no PC2 (172.16.118.250) o iperf foi configurado como servidor (-s) para receber tráfego TCP do PC1 (18.19.20.5), atualizando o console no intervalo de 1 segundo (-i1). O tráfego de pacotes TCP entre o PC2 e o PC1 é necessário para observar o comportamento do escalonador de QoS, que prioriza o tráfego de voz, na presença de tráfego concorrente.

A Tabela 13 apresenta as características e especificações dos equipamentos utilizados.

LTE de 450 MHz		
eNodeB (WXBR, 2015a)	Fabricante	WxBr
	Compatibilidade com 3GPP forum	Release 8/9
	Modo de interconexão LTE	FDD
	Banda de operação	31
	Faixa de Frequência	450 MHz–470 MHz - Banda de Operação 31 (LTE - FDD)
	Largura de banda	5 MHz
	Potência de transmissão	2 x 10 W (MIMO)
Terminal UE (WXBR, 2015b)	Taxas PHY	37 Mbps (DL) e 18 Mbps (UL) - MIMO
	Fabricante	WxBr
	Compatibilidade com 3GPP forum	Release 8/9
	Modo de interconexão LTE	FDD
	Banda de operação	31
	Faixa de Frequência	451 MHz–458 MHz (UL)/461 MHz –468 MHz (DL)
	Largura de banda	5 MHz
	Esquemas de modulação	64QAM/16APQAM/QPSK
	Categoria	3
	Potência de transmissão	23 dBm
EPC Compacta v.2.1.x	Taxa Máxima de transmissão	16,8 Mbps
	Sensibilidade do receptor	-100 dBm (Utilizando 25 resource blocks e modulação QPSK)
	Fabricante	Aricent
	Sistema Operacional	CentOS release 5.8
Computadores Auxiliares		
PC 1	Memória RAM	4 Gbytes
	Processador	Intel(R) Core i7
	Softwares Instalados	Ixia Endpoint para IxChariot 6.50 softphone Xlite v.4.8.4 iperf
	Sistema Operacional	Windows 7
PC 2	Memória RAM	4 Gbytes
	Processador	Intel(R) Core i7
	Softwares Instalados	Ixia Endpoint para IxChariot 6.50 softphone Xlite v.4.8.4 iperf
	Sistema Operacional	Windows 98
PC 3	Memória RAM	1 Gbytes
	Processador	Pentium
	Softwares Instalados	Ixia IxChariot v. 6.50
	Sistema Operacional	linux Ubuntu 12.03
PC 4	Memória RAM	2 Gbytes
	Processador	Intel(R) Core i7
	Softwares Instalados	Elastix Sip Server
Diversos		
Cabo Coaxial de RF (PASTERNAK, 2014)	Impedância característica	50 ohms
	Velocidade de propagação	66 %
	Frequência de operação	400 MHz
	Atenuação	26,9 dB/100m
Conectores de RF SMA (ELECTRONICS, 2015)	MIL-C-39012	
Atenuador variável (WEINSCHEL, 2015)	Impedância nominal	50 ohms
	Alcance de frequência	dc to 2,0 GHz
	Alcance incremental do atenuador	114 dB
	Alcance máximo SWR	dc - 1 GHz = 1,50 1 GHz - 2 GHz = 1,60

Tabela 13 – Características dos equipamentos utilizados nos testes.

5.1 Cenários de teste

O escalonador tem como uma de suas funções alocar canais para os diferentes serviços utilizados pelos diferentes dispositivos que se encontram na rede LTE. Assim, quanto mais serviços forem utilizados de forma concorrente pelos dispositivos, mais intensas serão as atividades de gerenciamento realizadas pelo escalonador. Desta forma, foram criados vários cenários, todos com tráfego de voz através do fluxo de serviço dedicado e tráfego concorrente TCP bidirecional através do fluxo de serviço padrão. Procurou-se com isso estressar ao máximo o trabalho deste escalonador, e avaliar o seu desempenho por meio de métricas como MOS e vazão de dados. O objetivo dos testes foi de verificar se, mesmo com tráfego concorrente, o que seria teoricamente a situação mais crítica possível, o escalonador atua de forma que as chamadas de voz não percam a qualidade.

Os cenários de teste considerados são apresentados na Tabela 14.

Cenário de teste	Número de chamadas	Posição do terminal	QCI	Tipo de fluxo de serviço	Tráfego	Esquema de modulação	Ferramenta utilizada
I	4, 10, 20	meio da célula	1	Dedicado	RTP	Adaptativa	IxChariot
			7	padrão	concorrente TCP		
II	20	centro, meio e borda da célula	1	Dedicado	RTP	Adaptativa	IxChariot
			7	padrão	concorrente TCP		
III	uma chamada com softphone	centro, meio e borda da célula	1	Dedicado	RTP	Adaptativa	PESQ
			7	padrão	concorrente TCP		

Tabela 14 – Cenários de teste.

Nota-se nesta tabela que o tráfego do fluxo de serviço dedicado foi configurado ou como do tipo GBR com QCI = 1, ou como do tipo non-GBR com QCI = 7 (ver Tabela 1 para maiores detalhes sobre QCI).

Para o caso GBR com QCI = 1, o tráfego concorrente inserido no fluxo de serviço padrão correspondeu ao máximo tráfego suportado pelo canal LTE utilizado. Deste modo, foi assegurado que no fluxo de serviço padrão havia tráfego concorrente com o fluxo de serviço dedicado em uma condição de congestionamento, a fim de verificar o comportamento da rede ao utilizar o escalonador com *QoS aware Weighted Priority* (WP).

Para o caso non-GBR com QCI = 7, o tráfego gerado no fluxo de serviço padrão correspondeu a um valor um pouco abaixo da máxima taxa suportada pelo canal LTE de forma a permitir o surgimento de algum congestionamento quando da geração do tráfego RTP, mas não a sua anulação devido ao congestionamento.

A posição do terminal UE na célula da eNodeB foi ajustada nos experimentos por meio do ajuste dos valores de atenuação, usando-se um atenuador variável, de acordo com o mapeamento dos valores de referência de Signal to Noise Ratio (SNR). Os valores de atenuação necessários para emular um terminal UE nas posições “centro da célula”, “meio da célula” e “borda da célula”, bem com os respectivos valores de SNR, estão indicados na Tabela 15.

Posição da célula	SNR medido em campo (dB)	Atenuação necessária nos experimentos (dB)	Modulação atingida
Centro	24	78,5	64-QAM
Meio	15	87,5	16-QAM
Borda	7,5	95	QPSK

Tabela 15 – Valores de atenuação medidos para definição aproximada da posição do terminal UE na célula da eNodeB.

Os valores de SNR mostrados na Tabela 15 foram medidos em campo pela equipe de testes de campo da Fundação CPqD e publicados em um relatório interno. Os valores da coluna Atenuação dessa tabela são aqueles usados nos experimentos conduzidos nesse trabalho para se atingir os valores de SNR correspondentes. Através dos valores fixados pelo atenuador ajustável correspondentes ao centro, meio e borda da célula da eNodeB se verificou, através dos parâmetros da eNodeB, que a modulação empregada no enlace foi ajustada adaptativamente, para as modulações 64-QAM, 16-QAM e QPSK, respectivamente.

A Figura 15 mostra as posições aproximadas do terminal UE de acordo com os valores configurados com o atenuador variável (vide Tabela 15).

5.1.1 Cenário I

O objetivo do Cenário I foi o de se variar a quantidade de chamadas de voz, através da utilização da ferramenta IxChariot, mantendo-se a posição do terminal fixa em uma região de médio alcance da eNodeB, utilizando-se modulação adaptativa.

Um parâmetro importante que caracteriza o cenário de testes I foi o número de chamadas RTP, codificadas através do codec G.711, que iriam trafegar entre o PC1 conectado ao terminal UE até o PC2 conectado por sua vez à rede onde se encontra a EPC, conforme mostrado no cenário da Figura 12. Essa configuração foi realizada pela ferramenta IxChariot, conforme mostrado na Figura 13.

Foi configurado um total de 20 pares de chamadas RTP trafegando através do fluxo de serviço dedicado, do tipo GBR usando QCI = 1. Destes 20 pares, 10 foram utilizados para gerar um tráfego de voz de taxa de 640 kbps no sentido de *downlink*, ou seja, com origem no

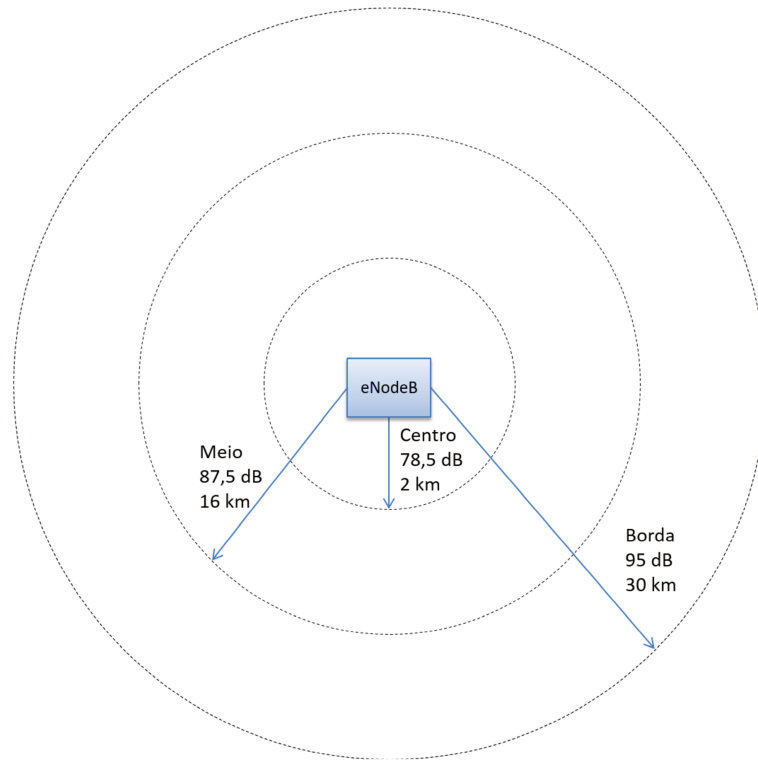


Figura 15 – Posição do terminal na célula da eNodeB.

PC2 e destino para o PC1 e os outros 10 pares foram utilizados para gerar um tráfego de voz de taxa de 640 kbps no sentido de *uplink*, ou seja, com origem no PC1 e destino para o PC2.

Para obtermos os pares a serem trafegados de acordo com o cenário I da Tabela 14, foi necessário somente habilitar os pares de *downlink* e *uplink* desejados. Por exemplo, para trafegarmos os 4 pares, habilitou-se os 4 primeiros pares de *downlink* e os 4 primeiros pares de *uplink*.

A Tabela 16 mostra as taxas de tráfego correspondentes ao número de chamadas utilizadas para o Cenário I.

Número de chamadas	Direção	Taxa de tráfego
2	<i>Uplink</i>	128 kbps
2	<i>Downlink</i>	128 kbps
5	<i>Uplink</i>	320 kbps
5	<i>Downlink</i>	320 kbps
10	<i>Uplink</i>	640 kbps
10	<i>Downlink</i>	640 kbps

Tabela 16 – Taxas de tráfego correspondentes ao número de chamadas utilizadas para o Cenário I.

A versão da ferramenta IxChariot disponível para a realização dos testes de voz limitou o número máximo de chamadas de voz à 20, correspondendo a 1280 kb/s.

A decisão de utilizar o codec G.711 deveu-se ao fato de que, com esse codec é possível configurar a máxima vazão de tráfego de voz possível de modo a verificar o comportamento do escalonador utilizado. Além disso, a versão da ferramenta IxChariot não possuía os codecs normalmente utilizados pelo sistema LTE (AMR-WB e EVS por exemplo).

5.1.2 Cenário II

A diferença entre os Cenários I e II está na posição do terminal UE. No Cenário II o terminal foi fixado no centro, no meio e na borda da célula antes das medições serem realizadas. Para tal, foram usados os valores médios de atenuação encontrados na Tabela 15.

Ainda neste Cenário, o número de chamadas a serem trafegadas pela rede foi igual a 20 pares RTP, sendo 10 pares para *downlink* e 10 pares para *uplink* correspondentes a um tráfego de 640 kbps de *downlink* e 640 kbps de *uplink*, respectivamente.

Conforme explicado no cenário I, a utilização de 20 pares de chamadas a 1280 kbps no total, bem como a utilização do codec G.711 nestas chamadas veio pelo fato de se utilizar a versão limitada da ferramenta IxChariot.

O tráfego concorrente TCP usado no Cenário II tem as mesmas características que aquele usado no Cenário I sendo gerado através da ferramenta iperf utilizando o comando conforme indicado pela Tabela 12.

5.1.3 Cenário III

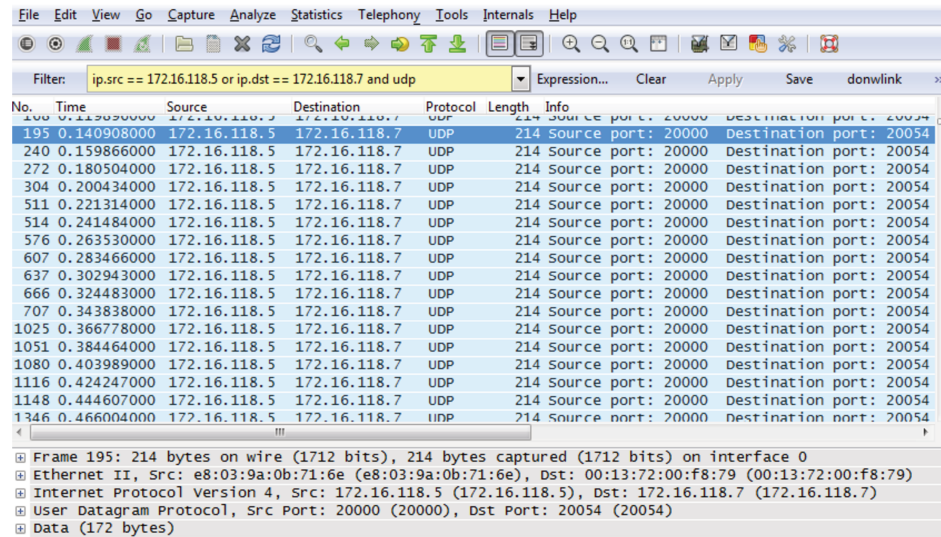
O objetivo dos testes nesse cenário foi estimar a qualidade de uma chamada de voz real, realizada por meio de um *softphone*. Para tal foram feitas chamadas de voz, utilizando um SIP *softphone*, que é um aplicativo que simula um telefone VoIP. Esse aplicativo estava instalado no PC1 e no PC2. As chamadas de voz trafegaram entre os SIP *softphones* pela rede LTE encapsuladas em pacotes RTP. O procedimento de teste consistiu na conversação alternada de um texto combinado entre os interlocutores.

Foi utilizado o codec G.711 para o tráfego de voz entre os softphones de modo a alinhar as configurações utilizadas nos cenários I e II para fins de comparação dos resultados no final dos testes.

Neste cenário, similarmente ao Cenário II, o terminal foi fixado no centro, no meio e na borda da célula.

A conversação realizada foi capturada através da ferramenta *wireshark* (WIRESHARK, 2014) de modo que dois arquivos de dados UDP foram gerados (Figura 16). Esses arquivos foram convertidos para o formato RTP (Figura 17) e, em seguida, convertidos para o format

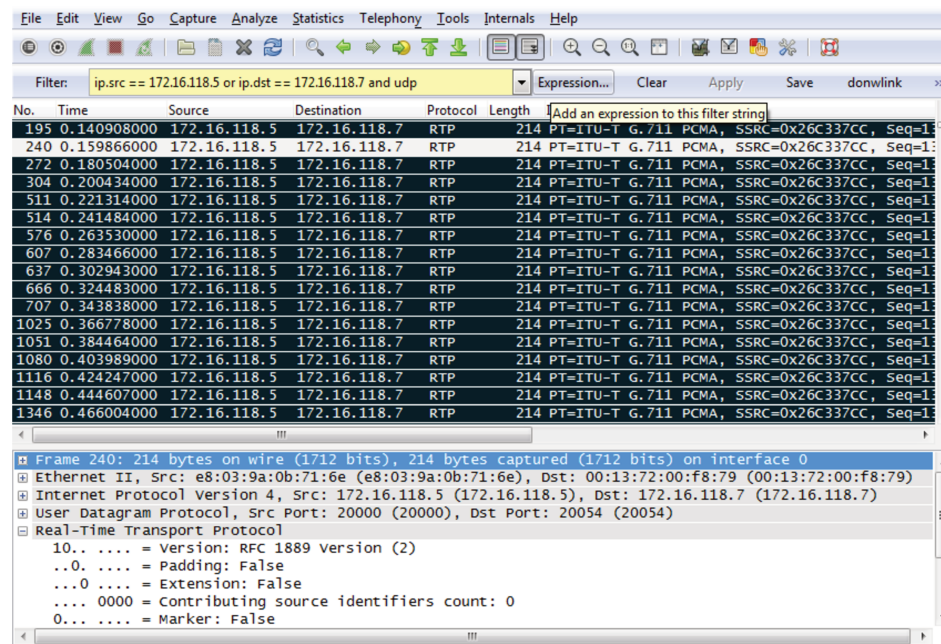
RAW (Figura 18) para, posteriormente, serem convertidos para o format WAV, através do aplicativo *audacity* (AUDACITY, 2014) (Figura 19).



No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
195	0.140908000	172.16.118.5	172.16.118.7	UDP	214	Source port: 20000 Destination port: 20054
240	0.159866000	172.16.118.5	172.16.118.7	UDP	214	Source port: 20000 Destination port: 20054
272	0.180504000	172.16.118.5	172.16.118.7	UDP	214	Source port: 20000 Destination port: 20054
304	0.200434000	172.16.118.5	172.16.118.7	UDP	214	Source port: 20000 Destination port: 20054
511	0.221314000	172.16.118.5	172.16.118.7	UDP	214	Source port: 20000 Destination port: 20054
514	0.241484000	172.16.118.5	172.16.118.7	UDP	214	Source port: 20000 Destination port: 20054
576	0.263530000	172.16.118.5	172.16.118.7	UDP	214	Source port: 20000 Destination port: 20054
607	0.283466000	172.16.118.5	172.16.118.7	UDP	214	Source port: 20000 Destination port: 20054
637	0.302943000	172.16.118.5	172.16.118.7	UDP	214	Source port: 20000 Destination port: 20054
666	0.324483000	172.16.118.5	172.16.118.7	UDP	214	Source port: 20000 Destination port: 20054
707	0.343838000	172.16.118.5	172.16.118.7	UDP	214	Source port: 20000 Destination port: 20054
1025	0.366778000	172.16.118.5	172.16.118.7	UDP	214	Source port: 20000 Destination port: 20054
1051	0.384464000	172.16.118.5	172.16.118.7	UDP	214	Source port: 20000 Destination port: 20054
1080	0.403989000	172.16.118.5	172.16.118.7	UDP	214	Source port: 20000 Destination port: 20054
1116	0.424247000	172.16.118.5	172.16.118.7	UDP	214	Source port: 20000 Destination port: 20054
1148	0.444607000	172.16.118.5	172.16.118.7	UDP	214	Source port: 20000 Destination port: 20054
1346	0.466004000	172.16.118.5	172.16.118.7	UDP	214	Source port: 20000 Destination port: 20054

Frame 195: 214 bytes on wire (1712 bits), 214 bytes captured (1712 bits) on interface 0
 Ethernet II, Src: e8:03:9a:0b:71:6e (e8:03:9a:0b:71:6e), Dst: 00:13:72:00:f8:79 (00:13:72:00:f8:79)
 Internet Protocol Version 4, Src: 172.16.118.5 (172.16.118.5), Dst: 172.16.118.7 (172.16.118.7)
 User Datagram Protocol, Src Port: 20000 (20000), Dst Port: 20054 (20054)
 Data (172 bytes)

Figura 16 – Pacotes UDP de voz obtidos pelo *wireshark*.



No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
195	0.140908000	172.16.118.5	172.16.118.7	RTP	214	PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x26C337CC, Seq=1
240	0.159866000	172.16.118.5	172.16.118.7	RTP	214	PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x26C337CC, Seq=1
272	0.180504000	172.16.118.5	172.16.118.7	RTP	214	PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x26C337CC, Seq=1
304	0.200434000	172.16.118.5	172.16.118.7	RTP	214	PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x26C337CC, Seq=1
511	0.221314000	172.16.118.5	172.16.118.7	RTP	214	PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x26C337CC, Seq=1
514	0.241484000	172.16.118.5	172.16.118.7	RTP	214	PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x26C337CC, Seq=1
576	0.263530000	172.16.118.5	172.16.118.7	RTP	214	PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x26C337CC, Seq=1
607	0.283466000	172.16.118.5	172.16.118.7	RTP	214	PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x26C337CC, Seq=1
637	0.302943000	172.16.118.5	172.16.118.7	RTP	214	PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x26C337CC, Seq=1
666	0.324483000	172.16.118.5	172.16.118.7	RTP	214	PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x26C337CC, Seq=1
707	0.343838000	172.16.118.5	172.16.118.7	RTP	214	PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x26C337CC, Seq=1
1025	0.366778000	172.16.118.5	172.16.118.7	RTP	214	PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x26C337CC, Seq=1
1051	0.384464000	172.16.118.5	172.16.118.7	RTP	214	PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x26C337CC, Seq=1
1080	0.403989000	172.16.118.5	172.16.118.7	RTP	214	PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x26C337CC, Seq=1
1116	0.424247000	172.16.118.5	172.16.118.7	RTP	214	PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x26C337CC, Seq=1
1148	0.444607000	172.16.118.5	172.16.118.7	RTP	214	PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x26C337CC, Seq=1
1346	0.466004000	172.16.118.5	172.16.118.7	RTP	214	PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x26C337CC, Seq=1

Frame 240: 214 bytes on wire (1712 bits), 214 bytes captured (1712 bits) on interface 0
 Ethernet II, Src: e8:03:9a:0b:71:6e (e8:03:9a:0b:71:6e), Dst: 00:13:72:00:f8:79 (00:13:72:00:f8:79)
 Internet Protocol Version 4, Src: 172.16.118.5 (172.16.118.5), Dst: 172.16.118.7 (172.16.118.7)
 User Datagram Protocol, Src Port: 20000 (20000), Dst Port: 20054 (20054)
 Real-Time Transport Protocol
 10.. = Version: RFC 1889 Version (2)
 ..0. = Padding: False
 ...0 = Extension: False
 0000 = Contributing source identifiers count: 0
 0... = Marker: False

Figura 17 – Pacotes UDP convertidos para RTP através do *wireshark*.

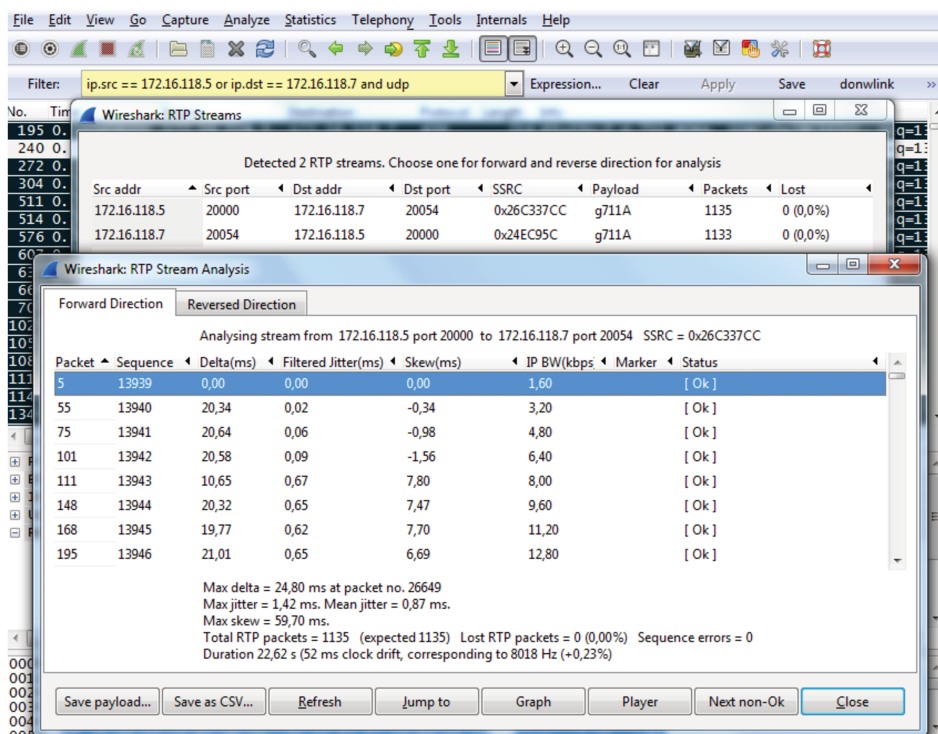


Figura 18 – Pacotes RTP convertidos para RAW através do *wireshark*.

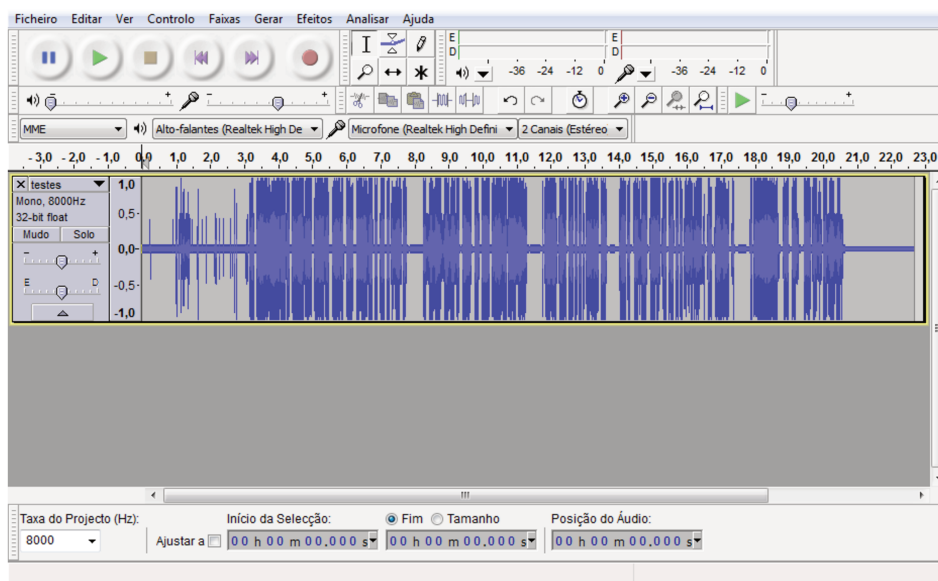


Figura 19 – Pacotes RAW convertidos para WAV através do *audacity*.

Desta forma, no final do procedimento de obtenção dos arquivos de voz no formato WAV, foram obtidos dois arquivos, um com origem no PC 1 e outro contendo o mesmo conteúdo de áudio, com origem no PC 2.

Esses dois arquivos foram, então processados pela ferramenta PESQ, para obter os valores de predição P.862 Raw MOS e MOS-LQO, de modo a estimar o valor da qualidade da chamada de voz realizada neste cenário. A tabela 17 mostra a sintaxe e execução do comando PESQ.

```
./PESQ +8000 voip_dl_epc_c1_traf_85db.wav voip_dl_ue_c1_traf_85db.wav  
  
Reading reference file voip_dl_epc_c1_traf_85db.wav...done.  
Reading degraded file voip_dl_ue_c1_traf_85db.wav...done.  
Level normalization...  
IRS filtering...  
Variable delay compensation...  
Acoustic model processing...  
P.862 Prediction (Raw MOS, MOS-LQO): = 4.067 4.218
```

Tabela 17 – Utilização da ferramenta PESQ para obtenção do MOS-LQO.

6 Resultados obtidos

Nos experimentos realizados conforme descrição apresentada na seção anterior, foram coletados dados sobre o MOS, latência e *jitter* nas chamadas realizadas. Nesta seção, esses resultados são apresentados e analisados.

6.1 Cenário I

A Tabela 18 mostra os resultados de MOS (MOS-CQE) e atraso em uma direção, obtidos pela ferramenta IxChariot, para os testes de tráfego de voz realizado para o Cenário I, com o tráfego de voz passando pelo fluxo de serviço dedicado do tipo GBR configurado com QCI = 1, sem tráfego concorrente e com tráfego concorrente. O tráfego concorrente, quando existente, utilizou fluxo de serviço padrão do tipo non-GBR configurado com QCI = 7.

fluxo de serviço dedicado com QCI = 1 e sem tráfego concorrente.		
Número de chamadas	Média de MOS	Média de atraso em uma direção (msec)
4	4,35	33
10	4,35	32
20	4,35	36
fluxo de serviço dedicado com QCI = 1 e fluxo de serviço padrão com QCI = 9. Tráfego concorrente TCP de <i>downlink</i> = 15 Mbps.		
Número de chamadas	Média de MOS	Média de atraso em uma direção (msec)
4	3,94	75
10	3,96	77
20	4,14	74

Tabela 18 – Resultados de MOS e atraso para o Cenário I, com tráfego de voz empregando fluxo de serviço dedicado com QCI = 1, sem e com tráfego concorrente.

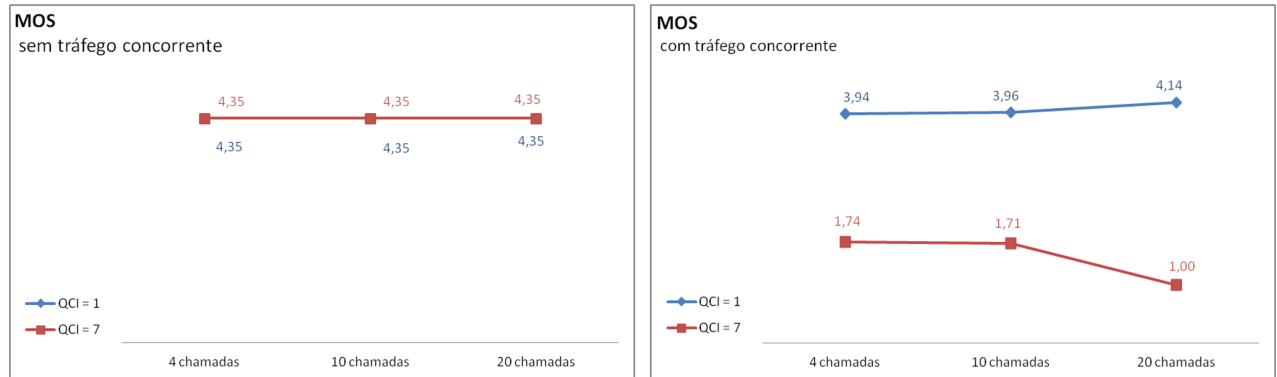
Os resultados foram obtidos para a quantidade de 4, 10 e 20 chamadas de voz RTP, utilizando o codec G.711 e geradas pela ferramenta IxChariot.

A Tabela 19 apresenta os valores de MOS e atraso também para o Cenário I, mas agora para o caso em que o tráfego de voz passa pelo fluxo de serviço dedicado do tipo non-GBR, configurado com QCI = 7.

fluxo de serviço dedicado com QCI = 7 sem tráfego concorrente.		
Número de chamadas	Média de MOS	Média de atraso em uma direção (msec)
4	4,35	33
10	4,35	36
20	4,35	50
fluxo de serviço dedicado com QCI = 7 e fluxo de serviço padrão com QCI = 9. Tráfego concorrente TCP de <i>downlink</i> = 15 Mbps.		
Número de chamadas	Média de MOS	Média de atraso em uma direção (msec)
4	1,74	135
10	1,71	149
20	1,00	181

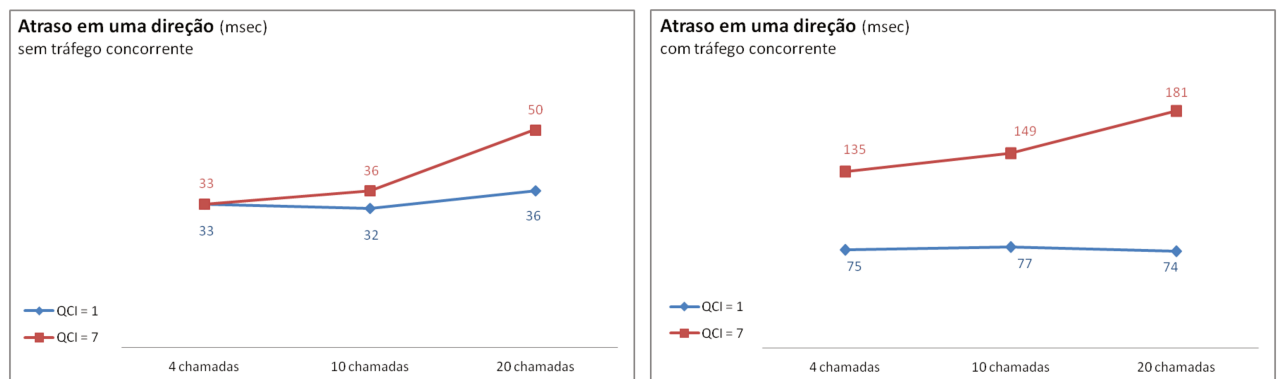
Tabela 19 – Resultados de MOS e atraso para o Cenário I, com tráfego de voz empregando fluxo de serviço dedicado com QCI = 7, sem e com tráfego concorrente.

Os resultados apresentados nas Tabelas 18 e 19 são mostrados na forma de gráficos nas Figuras 20 e 21 para facilitar a análise.



(a) Comparação do MOS entre os dois QCIs sem tráfego concorrente. (b) Comparação do MOS entre os dois QCIs com tráfego concorrente

Figura 20 – Comparação de valores de MOS obtidos para o tráfego de voz utilizando QCI = 1 e QCI = 7, sem e com tráfego concorrente



(a) Comparação do atraso entre os dois QCIs sem tráfego concorrente. (b) Comparação do atraso entre os dois QCIs com tráfego concorrente

Figura 21 – Comparação de valores de atraso obtidos para o tráfego de voz utilizando QCI = 1 e QCI = 7, sem e com tráfego concorrente

6.1.1 Análise do MOS

A Figura 20a mostra que, na ausência de tráfego concorrente, a qualidade da chamada de voz medida é excelente, independentemente do nível de *QoS Class Identifier*(QCI) adotado. O valor de MOS atingido (em torno de 4,35) corresponde à satisfação do usuário igual a 'muito satisfeito'. Nota-se também que o valor de MOS manteve-se constante quando o número de chamadas foi aumentado, passando de 4 para 20. Conjectura-se, no entanto, que a qualidade de voz pode degradar caso o número de chamadas cresça ainda mais, mesmo na ausência de tráfego concorrente. Essa situação não pode ser testada devido a limitações na ferramenta IxChariot de geração de tráfego empregada, como já citado.

Por outro lado, quando o tráfego concorrente está presente, os resultados mostram a importância da configuração do QCI do fluxo de serviço dedicado do tráfego de voz, como mostra a Figura 20b. Para o caso $QCI = 1$, observa-se uma degradação do MOS, quando comparado com o caso sem tráfego concorrente, como esperado. No entanto, ainda para o caso $QCI = 1$ e para o número de chamadas testado, observa-se que o MOS não degradou com a intensidade de tráfego de voz. Nota-se, porém, que quando $QCI = 7$ foi utilizado, há uma degradação do MOS devido ao tráfego concorrente, e essa degradação é tanto maior quando maior for o número de chamadas simultâneas.

6.1.2 Análise do atraso

Os resultados mostram que o atraso tem um comportamento semelhante à qualidade de voz, sendo, no entanto, um pouco mais sensível à quantidade de chamadas e ao QCI empregado. A Figura 21a mostra que, sem tráfego concorrente, com o uso de $QCI = 1$ conseguiu-se manter o atraso médio fixo quando o número de chamadas cresceu. No entanto, quando foi usado $QCI = 7$, o atraso tornou-se sensível ao número de chamadas.

Esse mesmo comportamento foi observado no caso em que o tráfego concorrente estava presente. Isto é, o uso de QCI tornou o atraso insensível ao número de chamadas (para os valores testados), enquanto que para $QCI = 7$, o atraso aumentou com o aumento no número de chamadas.

Deve ser novamente ressaltado que níveis de degradação maiores são esperados para números de chamadas maiores.

6.2 Cenário II

A Tabela 20 mostra os resultados de MOS (MOS-CQE), atraso em uma direção (latência) e *jitter*, obtidos pela ferramenta IxChariot, para os testes de tráfego de voz realizado para o Cenário II, com o tráfego de voz passando pelo fluxo de serviço dedicado GBR configurado com QCI = 1, com tráfego concorrente passando pelo fluxo de serviço padrão non-GBR configurado com QCI = 9. Os dados foram obtidos para uma quantidade de 20 chamadas de voz, variando-se desta vez a posição do terminal UE dentro da célula da eNodeB.

fluxo de serviço dedicado com QCI = 1 e fluxo de serviço padrão com QCI = 9 com 20 chamadas fixas.					
Posição do terminal UE na célula	SNR (dB)	Média de MOS	Média de atraso em uma direção (msec)	<i>Jitter</i> médio (msec)	vazão do tráfego concorrente (Mbps)
Centro	24	4,33	38	2,20	15
Meio	15	4,08	39	4,30	10
borda	7,5	4,23	41	3,16	5

Tabela 20 – Resultados obtidos para o cenário de teste II, QCI = 1, com tráfego concorrente.

A Tabela 21 mostra os resultados para uma situação semelhante àquela na Tabela 20, com a diferença de que agora o tráfego das chamadas de voz passa pelo fluxo de serviço dedicado do tipo non-GBR com QCI = 7. Os valores foram obtidos para uma quantidade de 20 chamadas fixas de voz RTP utilizando o codec G.711u geradas pela ferramenta IxChariot variando-se desta vez a posição do terminal UE dentro da célula de alcance da eNodeB.

fluxo de serviço dedicado com QCI = 7 e fluxo de serviço padrão com QCI = 9 com 20 chamadas fixas.					
Posição do terminal UE na célula	SNR (dB)	Média de MOS	Média de atraso em uma direção (msec)	<i>Jitter</i> médio (msec)	vazão do tráfego concorrente (Mbps)
Centro	24	3,46	283	15,78	16,00
Meio	15	3,40	289	23,95	10,60
borda	7,5	3,48	298	42,16	5,52

Tabela 21 – Resultados obtidos para o cenário de teste II, QCI = 7, com tráfego concorrente.

A Figura 22 mostra na forma de gráficos os resultados apresentados nas Tabelas 20 e 21.

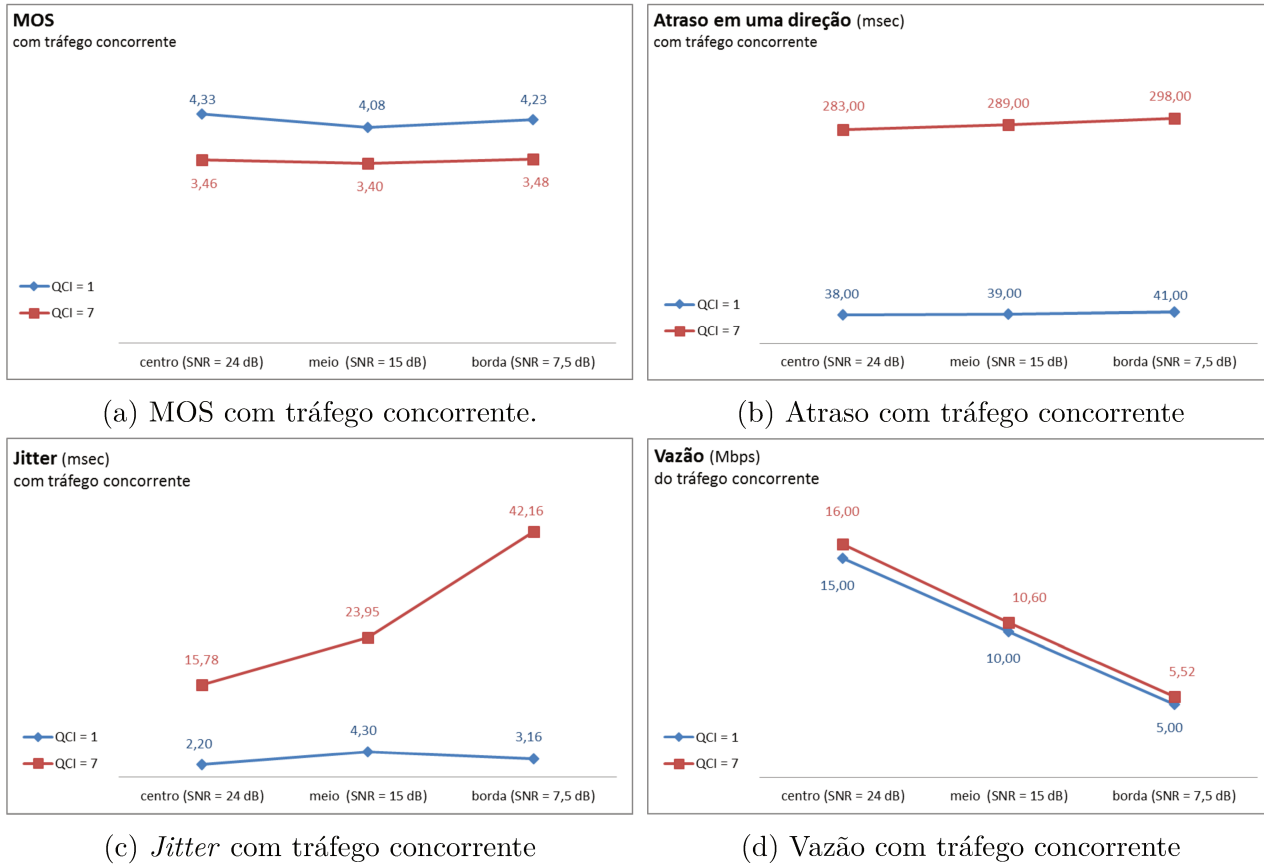


Figura 22 – Valores de MOS, Atraso e *Jitter* obtidos para o tráfego de voz através do fluxo de serviço com QCI = 1 e do fluxo de serviço com QCI = 7 e vazão de donwlink do tráfego concorrente para o cenário de teste II.

A Figura 22a mostra que a posição do terminal UE na célula teve pouca influência no MOS em ambos os casos QCI = 1 e QCI = 7. Para as configurações de QoS onde a priorização do tráfego de voz é usada (QCI = 1), o MOS manteve-se em torno de 4,2, o que corresponde a 'satisfeito' e 'muito satisfeito'. Já para o QCI = 7, que não possui priorização de voz essa pontuação MOS manteve-se em 3,4, o que corresponde a 'Alguns usuários insatisfeitos' e 'Muitos usuários insatisfeitos'. Portanto, eventuais diferenças na qualidade do sinal recebido, devido às diferentes posições do terminal UE, não causaram variações no MOS.

Os resultados obtidos para o atraso (Figura 22b) mostram uma já esperada diferença dos valores de atraso entre os casos com QCI = 1 e QCI = 7. No entanto, o atraso também manteve-se praticamente invariante com a mudança da posição do terminal UE na célula.

A Figura 22c mostra que o *jitter* se mantém praticamente constante e com um valor baixo, quando o QCI = 1 é utilizado. Para o QCI = 7, observamos um valor relativamente

maior que o *jitter* obtido com o $QCI = 1$ e tendendo a aumentar à medida que o terminal UE se desloca na célula da eNodeB.

Por fim, pela Figura 22d verificamos também uma gradativa queda da vazão do tráfego concorrente à medida que o terminal UE se desloca para a borda da célula.

Esses resultados indicam que utilizando-se as configurações de priorização de voz através do $QCI = 1$, o escalonador QoS atua de forma a manter a qualidade de voz à medida que o terminal se desloca dentro da célula da eNodeB. Além disso, por estarmos utilizando modulação adaptativa, verificamos também a variação da vazão do tráfego concorrente com o deslocamento do terminal UE.

6.3 Cenário III

A Tabela 22 mostra os resultados de MOS-LQ0, medidos através da ferramenta PESQ, para os testes de tráfego de voz no Cenário III, com o tráfego de voz passando pelo fluxo de serviço dedicado GBR configurado com QCI = 1, e com tráfego concorrente passando pelo fluxo de serviço padrão non-GBR configurado com QCI = 9.

fluxo de serviço dedicado com QCI = 1 e fluxo de serviço padrão com QCI = 9 com 20 chamadas fixas.		
Posição do terminal UE na célula	Média de MOS-LQ0	Média de Vazão (Mbps)
Centro	4,218	14,74
Meio	4,131	5,80
borda	3,901	2,55

Tabela 22 – Resultados obtidos para o Cenário III, QCI = 1 , com tráfego concorrente.

A Tabela 23 mostra os resultados de um caso semelhante àquele da Tabela 22, exceto pelo fato de que agora o tráfego de voz emprega o QCI = 7.

fluxo de serviço dedicado com QCI = 7 e fluxo de serviço padrão com QCI = 9 com 20 chamadas fixas.		
Posição do terminal UE na célula	Média de MOS-LQ0	Média de Vazão (Mbps)
Centro	2,834	15,30
Meio	2,645	8,30
borda	2,184	2,70

Tabela 23 – Resultados obtidos para o Cenário III, QCI = 7 , com tráfego concorrente.

A Figura 23 mostra graficamente o comportamento do MOS-LQ0 para o teste realizado no cenário III ao se variar a posição do terminal UE dentro da célula de alcance da eNodeB, enquanto que a Figura 24 mostra o comportamento da vazão do tráfego concorrente que passa através do fluxo de serviço padrão com QCI = 9 para o fluxo de serviço dedicado configurado para QCI = 1 e QCI = 7.

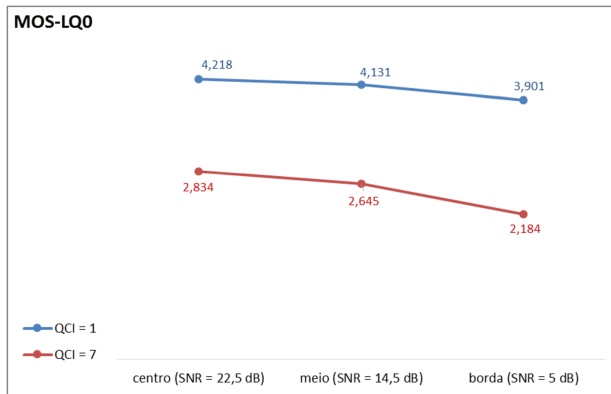


Figura 23 – Comparação do MOS-LQ0 entre os QCIs 1 e 7 para o tráfego de voz.

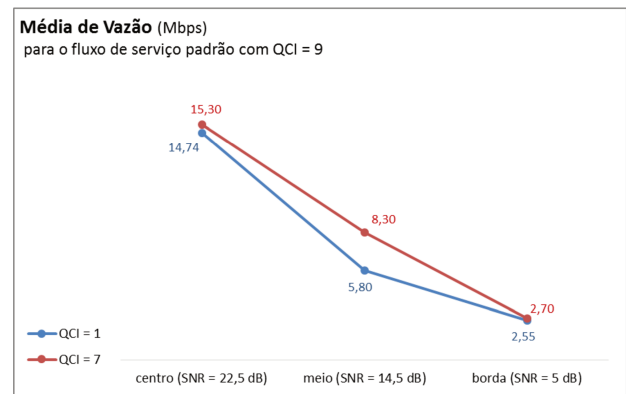


Figura 24 – Comportamento da vazão do tráfego concorrente que passa pelo fluxo de serviço padrão.

Observa-se na Figura 23 que a qualidade de voz degrada à medida que o terminal UE se afasta da eNodeB. No entanto, essa degradação é menos pronunciada quando a priorização do tráfego de voz ($QCI = 1$) é empregada em relação ao tráfego de voz sem priorização ($QCI = 7$).

Como esperado, a vazão do tráfego concorrente cai à medida que o terminal UE se afasta do centro da célula, devido à degradação do enlace. Desta maneira, conseguimos observar a atuação da modulação adaptativa em conjunto com o escalonador, de modo a modificar o tipo de modulação utilizada para assegurar a manutenção do serviço de voz com uma qualidade satisfatória, a medida que o terminal se afasta da eNodeB. A modulação adaptativa presente na eNodeB atuou de tal forma que foram utilizadas as modulações 64-QAM, 16-QAM e QPSK quando o terminal UE estava localizado no centro, meio e borda da eNodeB respectivamente.

Os resultados obtidos no Cenário III mostram que o escalonador consegue manter a qualidade de voz relativamente constante e satisfatória a medida que variamos a posição do terminal UE na célula da eNodeB. Neste cenário em particular, pudemos verificar essa qualidade através da realização de uma chamada VoIP real, enquanto havia tráfego concorrente em paralelo com ela.

7 Conclusão

Neste trabalho foram apresentados resultados de testes de avaliação de qualidade de chamadas de voz empregando VoIP em um sistema LTE real, operando na faixa de 450 MHz, em ambiente de laboratório. O sistema testado empregou um escalonador com *QoS Aware WP* incorporado à eNodeB, de forma a prover prioridade à chamadas de voz.

Os resultados mostram qualitativamente que:

- A manutenção da qualidade de chamadas VoIP é expressivamente maior com o uso do QCI = 1, do tipo GBR, do que com o uso do QCI = 7, do tipo non-GBR, para o fluxo de serviço dedicado utilizado para o tráfego de voz.
- Para o QCI = 1 o MOS manteve-se constante para a variação do número de chamadas de voz utilizando o terminal UE em uma posição fixa, como visto no Cenário de teste I.
- O MOS manteve-se constante mesmo em condições adversas, como o aumento do atraso em condições de tráfego concorrente ou em condições de degradação da recepção do sinal devido à variação da posição do terminal UE dentro da célula da eNodeB, como visto nos Cenários de teste II e III.

Os testes indicam que o algoritmo do escalonador empregado na eNodeB considera aspectos relacionados a modulação, classe de serviço, atraso e priorização de tráfego, com a alocação prioritária de recursos com QCI=1 para garantir a qualidade das chamadas de voz que passam pelo fluxo de serviço dedicado que utiliza esse QCI. Além disso, os resultados obtidos nos testes demonstram conformidade com os padrões de QoS definidos pelo 3GPP.

Referências

- 3GPP. *TS 23.401: LTE; General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (Release 8)*. [S.l.], 2010. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 8.
- 3GPP. *TR 36.840: LTE 450 MHz in Brazil Work Item Technical Report(Release 12)*. [S.l.], 2013. Citado 3 vezes nas páginas 1, 4 e 34.
- 3GPP. *ts 26171: Speech codec speech processing functions; Adaptive Multi-Rate - Wideband (AMR-WB) speech codec; General description (Release 6)*. [S.l.], 2013. Citado 2 vezes nas páginas xv e 18.
- 3GPP. *TS 36.306: User Equipment (UE) radio access capabilities (Release 8)*. [S.l.], 2013. Citado na página 6.
- 3GPP. *3GPP release 8*. [S.l.], 2014. Citado na página 1.
- 3GPP. *TS 23.203: Policy and charging control architecture(Release 8)*. [S.l.], 2014. Citado 2 vezes nas páginas xv e 12.
- 3GPP. *TS 25.331: Radio Resource Control (RRC);Protocol Specification (Release 8)*. [S.l.], 2014. Citado na página 5.
- 3GPP. *TS 26441: Codec for Enhanced Voice Services (EVS) - General Overview (Release 12)*. [S.l.], 2014. Citado 2 vezes nas páginas xv e 18.
- 3GPP. *TS 36.101: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 8)*. [S.l.], 2014. Citado na página 1.
- 3GPP. *TS 36.104: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 8)*. [S.l.], 2014. Citado na página 1.
- ABINASH. *eNodeB functions*. 2012. Disponível em: <<http://lteabi.blogspot.com.br/2012/12/enodeb-functions.html>>. Citado na página 7.
- AMERICAS, G. *MIMO Transmission Schemes for LTE and HSPA Networks*. [S.l.], 2009. Citado na página 3.
- ASCOM. *TD-LTE and FDD-LTE A Basic Comparison*. [S.l.], 2012. Citado na página 3.
- AUDACITY. *audacity*. 2014. Disponível em: <<http://audacity.sourceforge.net/>>. Citado na página 43.
- BASIR, A. *Quality of Service (QoS) in LTE*. 2008. Disponível em: <<http://4g-lte-world.blogspot.com.br/2013/01/quality-of-service-qos-in-lte.html>>. Citado na página 1.

- CISCO. *Voice Over IP - Per Call Bandwidth Consumption*. 2006. Disponível em: <<http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/voice/voice-quality/7934-bwidth-consume.html>>. Citado 2 vezes nas páginas xv e 18.
- CODE, G. *iperf TCP and UDP bandwidth performance measurement tool*. 2014. Disponível em: <<https://code.google.com/p/iperf/>>. Citado na página 31.
- COUNTERPATH. *X-Lite SIP Phone*. 2015. Disponível em: <<http://www.counterpath.com/x-lite/>>. Citado na página 33.
- ELECTRONICS, T. *RF Coax Connectors*. 2015. Disponível em: <<http://www.farnell.com/datasheets/196168.pdf>>. Citado na página 38.
- FREESCALE. *Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer*. [S.l.], 2008. Citado na página 3.
- GSMA. *IR.36: Adaptive Multirate Wide Band Version 2.0*. [S.l.], 2013. Citado na página 18.
- IETF. *RFC3261: SIP: Session Initiation Protocol*. [S.l.], 2002. Citado na página 18.
- IETF. *RFC3550: RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications*. [S.l.], 2003. Citado na página 19.
- IETF. *RFC4566: RTP: SDP: Session Description Protocol*. [S.l.], 2006. Citado na página 19.
- IIS, F. I. for I. C. *EnhancEd VoicE SErVicES (EVS) codEc*. [S.l.], 2015. Citado 2 vezes nas páginas xv e 18.
- IPERF, F. forum for. *What is Iperf?* 2014. Disponível em: <<https://iperf.fr/>>. Citado na página 31.
- ITU-T. *P.800: Methods for Subjective Determination of Transmission Quality*. [S.l.], 1996. Citado na página 25.
- ITU-T. *P.862.1: Mapping Functions for Transforming P.862 raw results scores to MOS-LQO*. [S.l.], 2003. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- ITU-T. *P.800.1: Mean Opinion Score Terminology*. [S.l.], 2006. Citado na página 25.
- ITU-T. *P.862: Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs*. [S.l.], 2007. Citado na página 27.
- ITU-T. *P.862.2: Wideband extension to Recommendation P.862 for the assessment of wideband telephone networks and speech codecs*. [S.l.], 2007. Citado na página 26.
- ITU-T. *G.107: The E-model: a computational model for use in transmission planning*. [S.l.], 2011. Citado na página 27.

IXIA. *IxChariot® User Guide Release 7.10 913-0949-04 Rev. A*. [S.l.], 2011. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 29.

KREHER, R.; GAENGER, K. *LTE Signaling, Troubleshooting and Optimization*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd., 2011. Citado na página 5.

LIMITED, R. M. R. *LTE MAC Scheduler & Radio Resource Scheduling*. [S.l.], 2011. Citado na página 12.

LTESIGNALING. *LTE Signaling: Troubleshooting and Optimization*. 2011. Disponível em: <<http://ltesignaling.blogspot.com.br/2011/09/enodeb-enb-network-elements-and.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 6.

MARINO, L. A. *Metodologias de Avaliação de Qualidade de Fluxos de Voz*. [S.l.], 2007. Citado na página 25.

MASTALIR, J. *Understanding SIP-Based VoIP*. 2014. Disponível em: <http://www.packetizer.com/ipmc/sip/papers/understanding_sip_voip>. Citado na página 20.

MASUM, M. E.; BABU, M. J. *End-to-End Delay Performance Evaluation for VoIP in the LTE network*. Dissertação (Mestrado) — Blekinge Institute of Technology, june 2011. Citado na página 1.

MCGREGOR, T. *National Laboratory for Applied Network Research*. 2014. Disponível em: <<https://iperf.fr/>>. Citado na página 31.

PASTERNAK. *Flexible RG223 Coax Cable Double Shielded with Black PVC Jacket*. 2014. Disponível em: <<https://www.pasternack.com/images/ProductPDF/RG223-U.pdf>>. Citado na página 38.

PSYTECHNICS. *PESQ: An Introduction White Paper*. [S.l.], 2001. Citado 2 vezes nas páginas xiii e 28.

PUTTONEN, J.; HENTTONEN, T.; KOLEHMAINEN, N.; ASCHAN, K.; MOISIO, M.; KELA, P. Voice-over-ip performance in ultra long term evolution downlink. *Vehicular Technology Conference*, p. 2502–2506, may 2008. IEEE VTC Spring 2008. Citado na página 1.

PUTTONEN, J.; KOLEHMAINEN, N.; HENTTONEN, T.; MOISIO, M. Persistent packet scheduling performance for voice-over-ip in evolved utran downlink. *Personal, Indoor and Mobile Radio Communication*, p. 1–6, september 2008. IEEE PIMRC 2008. Citado na página 1.

RASTOGI, M. K. *Developing a QoS aware framework for LTE 4G: Aricent Group*. 2012. Disponível em: <<http://www.telecomlead.com/whitepaper/developing-a-qos-aware-framework-for-lte-4g-aricent-group-8790>>. Citado na página 13.

SOLUTIONS, P. *Elastix IP PBX Software*. 2015. Disponível em: <<http://www.elastix.org/index.php/en/>>. Citado na página 34.

TAKAKI, R.; BAZZO, J. J.; ROCHA, F. M. F.; SEKI, J. Análise de desempenho do serviço de voz no sistema lte para diferentes condições de recepção na célula. *Cad. CPqD Tecnologia, Campinas, v. 9, n. 2, pp. 63-74*, december 2013. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 13.

TAKAKI, R.; SEKI, J.; BAZZO, J. J.; ROCHA, F. M. F.; SILVA, J. A. da; CARDIERI, P. Avaliação de desempenho voip em uma rede lte 450 mhz. *XXXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES – SBrT2013*, september 2013. Citado na página 3.

TANENBAUM, A. S. *Redes de Computadores*. [S.l.]: Editora Campus, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.

TUTORIALSPPOINT. *LTE Network Architecture*. 2014. Disponível em: <http://www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm>. Citado na página 5.

WEINSCHTEL, A. *Variable Attenuators*. 2015. Disponível em: <http://www.sematron.com/images/datasheets/Aeroflex_Weinschel_-_Attenuator_Model_940.pdf>. Citado na página 38.

WIRESHARK. *wireshark*. 2014. Disponível em: <<https://www.wireshark.org/>>. Citado na página 42.

WXBR. *eNodeB LTE 450 MHz Compacta WxBS4510L*. 2015. Disponível em: <<http://www.wxbr.com.br/produto-detalhado.aspx?ID=1>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 38.

WXBR. *Terminal de Usuário Indoor WxUE450*. 2015. Disponível em: <<http://www.wxbr.com.br/produto-detalhado.aspx?ID=1>>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 38.