

Avaliação de desempenho VoIP em uma rede LTE 450 MHz

Ricardo Takaki, Jorge Seki, Juliano J. Bazzo, Flávia M. F. Rocha, Jadir A. da Silva e Paulo Cardieri

Resumo — Este artigo apresenta o resultado de medições de desempenho de chamadas VoIP em um sistema celular 4G/LTE na faixa de 450 MHz destinado para cenários de aplicação suburbano e rural. Foi realizada a análise experimental do algoritmo de escalonamento implementado para o sistema, comparando o comportamento de dois diferentes tipos de configurações de QoS. Os resultados mostraram que o uso do escalonador QoS Aware Weighted Priority (WP) com taxa garantida (GBR) permite a manutenção da qualidade VoIP mesmo em condições de gargalo, se comparado com a utilização de esquema sem taxa garantida (non-GBR).

Palavras-chave: LTE 450 MHz, VoIP, atraso, jitter, MOS, QoS

Abstract — This article presents the performance measurement results of VoIP calls in a 4G/LTE cellular system in the 450 MHz band developed for suburban and rural application scenarios. Experimental analysis was performed for the scheduling algorithm implemented for the system, comparing the behavior of two different QoS (Quality of Service) configurations. The results showed that the use of a guaranteed bit rate (GBR) QoS Aware Weighted Priority (WP) scheduler allows the maintenance of VoIP quality even under bottleneck, comparing with the use of non-guaranteed bit rate (non-GBR) scheduler.

Keywords: LTE 450 MHz, VoIP, delay, jitter, MOS, QoS

I. INTRODUÇÃO

A tecnologia LTE (*Long Term Evolution*) vem sendo intensamente padronizada e desenvolvida nas suas diversas variantes no intuito de substituir os sistemas celulares 2G e 3G implantados mundialmente. Para áreas densamente povoadas, os sistemas LTE instalados utilizam principalmente as faixas de frequência de 700 MHz e 2,6 GHz, esta última leiloadada em 2012 para o Brasil e que também é utilizada na Europa. A padronização do LTE para a faixa de 450 MHz está em fase avançada no 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) [1], sendo que a banda 31 faz parte do padrão desde julho/2013 [2]. O LTE R8 (3GPP *Release* 8) descreve o suporte ao serviço VoIP definindo diferentes mecanismos de QoS (*Quality of Service*) [3] 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 GSM (*Global System for Mobile Communication*) e WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*).

O 3GPP também define interfaces para a integração dos elementos necessários ao estabelecimento de chamadas VoIP, como a interface entre o núcleo da rede LTE - EPC (*Evolved Packet Core*) [4] e o IMS (*IP Multimedia System*) para o tratamento das mensagens SIP. Diferentes mecanismos de QoS são utilizados no tratamento do tráfego RTP, tanto na EPC

como na rede de acesso e-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*), constituída de estações rádio base eNodeB (*Evolved Node B*) [5].

Trabalhos anteriores realizaram diversas análises da capacidade de chamadas VoIP e qualidade para diferentes configurações [6][7][8]. A maioria dos resultados foi obtida através de simulação.

Em [6], os autores avaliaram através de simulação os parâmetros de *atraso fim a fim* bem como a vazão na presença de tráfego VoIP, para diversos cenários contendo ou não terminais móveis.

Em [7], os autores avaliaram através de simulação os mecanismos de escalonamento de chamadas VoIP no canal direto da rede de acesso LTE. Os resultados mostraram restrições na capacidade quando utilizado o escalonamento de pacotes dinâmico em relação aos mecanismos de escalonamento persistentes. Para um cenário com múltiplas células, baixa mobilidade (3 km/h) e canal de 5 MHz, cada célula suportou aproximadamente 175 chamadas VoIP utilizando o escalonamento semi-persistente e entre 50 e 300 chamadas, empregando o escalonamento dinâmico de acordo com o número de símbolos disponíveis para o canal de controle PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*).

Em [8], o desempenho das chamadas VoIP utilizando o codificador de voz AMR (*Adaptive Multi-Rate*) é avaliado através de simulação. O cenário é multicelular com diferentes larguras de banda para os canais e distâncias entre células. Para os canais de 5 MHz, a capacidade variou de 175-300 chamadas para diferentes configurações quando a adaptação de enlace estava habilitada. O escalonador *Round Robin* (RR) foi utilizado no artigo. O trabalho também mostrou que ao habilitar a estratégia de *packet bundling*, a capacidade aumentou em mais de 30%.

Os trabalhos citados fazem uso de simulação e exploram diversos parâmetros num ambiente de múltiplas células, algo quase impossível de ser realizado com equipamentos reais. No entanto, os resultados são importantes não em termos absolutos, mas relativos considerando o ajuste de parâmetros quando a implantação for realizada em campo.

Esse artigo faz uma revisão da arquitetura dos elementos para prover o serviço de voz na rede LTE e mostra os resultados de um experimento real envolvendo um sistema LTE operando na faixa de 450 MHz. A Seção II contém uma breve descrição do LTE 450 MHz e as motivações para a análise do serviço de voz nesse cenário. A Seção III acrescenta informações sobre QoS em redes LTE. A Seção IV acrescenta informações sobre a metodologia de pontuação MOS (*Mean Opinion Score*). A Seção V descreve os testes de desempenho

realizados. A Seção VI explora os resultados obtidos e finalmente a Seção VII apresenta as conclusões.

II. LTE 450 MHz

O LTE 450 MHz surgiu como uma proposta de tecnologia para levar banda larga e serviços de comunicação para 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 prevê condições de propagação favoráveis com raios de cobertura superiores aos dos perfis atualmente padronizados no 3GPP.

O esforço para a especificação e desenvolvimento do LTE 450 MHz foi iniciado com foco no cenário brasileiro, onde a implantação dessa tecnologia deve contribuir com o objetivo de prover acesso universal a serviços banda larga em todo o território nacional, para todo o cidadão brasileiro. Isto significa disponibilizar estes serviços em áreas rurais abrangendo grande extensão 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 para as áreas rurais. Em 2012 foi realizado o leilão das licenças de operação baseado na Resolução nº 558 da Anatel [9]. Iniciativas recentes do governo para promover o Plano Nacional de Banda Larga também estão impulsionando o LTE 450 MHz como uma alternativa viável para atender os objetivos deste programa em áreas rurais. Essas ações são complementares e provêm condições para alavancar investimentos no setor de telecomunicações, propiciando criar um mercado ainda mais promissor 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 4G em regiões do mundo com baixa densidade demográfica. Para se alcançar esse objetivo, pode ser desafiadora a definição de modelos economicamente sustentáveis, particularmente quando são consideradas a implantação, operação e manutenção das redes.

O processo de padronização da banda de 450 MHz para o LTE foi iniciado em setembro de 2012 [1], como proposta inédita de uma empresa brasileira no 3GPP, e aborda vários desafios relacionados à canalização do espectro, coexistência com serviços adjacentes e parâmetros de desempenho de transmissão e de recepção. A banda 31 tornou-se parte do padrão em meados de 2013, encorajando as operadoras e a indústria para investir na tecnologia LTE na faixa de 450 MHz.

O estudo do desempenho do serviço VoIP nesse cenário é ainda mais relevante do que a aplicação no cenário urbano, onde as operadoras de telecomunicações consideram atualmente o provimento de serviços de voz através das tecnologias 2G e 3G já existentes, sendo o tráfego de dados em altas taxas suportado exclusivamente pela rede 4G/LTE. Para as áreas rurais, desprovidas de qualquer serviço até então, a tecnologia LTE 450 MHz será possivelmente a única alternativa para prover serviços de voz e de dados para essa população.

O leilão do 4G no Brasil ocorrido em 2012 também exigiu uma série de obrigações para as empresas operadoras vencedoras, dentre elas, o provimento de serviços de voz aos municípios atendidos. Ao ampliar a área de cobertura das empresas 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.

III. QoS em Redes LTE

O sistema LTE tem a habilidade de prover capacidades que permitem a oferta de diferentes categorias de serviços como voz, vídeo, mensagens e troca de arquivos de dados. Essas capacidades de serviços do sistema LTE são providas através da implementação de controle de QoS, que permite a alocação de recursos de acordo com os requisitos de qualidade do serviço.

O controle de QoS no sistema LTE se dá no nível de *bearer service* [4]. Um *bearer service* é definido como um tipo de serviço que provê a capacidade de transmissão de dados entre pontos de terminação no sistema LTE. Todo o tráfego mapeado no mesmo *bearer* recebe o mesmo tratamento para encaminhamento de pacotes, que inclui, por exemplo, a aplicação de políticas de escalonamento (*scheduling*) e políticas de gerenciamento de filas. Para prover diferentes tratamentos para encaminhamento de pacotes são necessários diferentes *bearers*.

A. Default bearer e dedicated bearer

O *default bearer* é estabelecido quando o terminal *UE* (*User Equipment*) se conecta a uma *PDN* (*Packet Data Network*) e é mantido durante toda a existência desta conexão provendo conectividade IP. Este *bearer* possui capacidades de QoS básicas. Para cada *PDN* a que o *UE* se conecta, um *default bearer* é estabelecido.

Qualquer *bearer* adicional estabelecido entre o terminal *UE* e a mesma conexão *PDN*, resultante de demanda por serviços com necessidades específicas de QoS, é denominado *dedicated bearer*.

Um *bearer* ainda pode ser classificado como GBR (*Guaranteed Bit Rate*) *bearer* ou *non-GBR bearer*. Um *bearer* é caracterizado como GBR *bearer* se os recursos de rede referentes ao valor de GBR associado a este *bearer* são permanentemente alocados (por exemplo, pela função de controle de admissão da *eNodeB*) quando do estabelecimento ou modificação do *bearer*. Caso contrário, é caracterizado como *non-GBR bearer*, sendo que, neste caso, não há garantia de que a taxa de bits atribuída será suportada.

B. Parâmetros de QoS

O perfil de QoS do *bearer* inclui os parâmetros QCI (QoS *Class Identifier*), *ARP* (*Allocation and Retention Priority*), GBR (*Guaranteed Bit Rate*) e *MBR* (*Maximum Bit Rate*) [4].

Para GBR *bearers* e *non-GBR bearers*, os parâmetros QCI e *ARP* são especificados. Para GBR *bearers*, também são especificados os parâmetros GBR e *MBR*.

Neste trabalho são considerados apenas os parâmetros de QoS que têm influência no estudo em questão.

▪ QCI (QoS *Class Identifier*)

Este parâmetro define a classe do serviço. Ele é usado como referência a parâmetros específicos (denominados *performance characteristics*) que controlam o tratamento de encaminhamento de pacotes em nível de *bearer*.

São 9 os valores de QCI definidos pelo 3GPP, conforme ilustra a Tabela I [10]. Para cada classe de QoS são definidas as seguintes características: tipo de recurso, nível de prioridade,

atraso - PDB (*Packet Delay Budget*) e taxa de perda de pacotes -PELR (*Packet Error Loss Rate*). O objetivo de padronizar um QCI com as correspondentes características é garantir que aplicações/serviços mapeados em determinados QCI recebam o mesmo nível de QoS mínimo em implantações que envolvem redes com vários fornecedores, bem como para o caso de *roaming*.

TABELA I. CARACTERÍSTICAS PADRONIZADAS DE QCI [10]

QCI	Tipo de Recurso	Nível de Prioridade	PDB (ms)	PELR	Serviços (exemplos)
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>) Serviços baseados em TCP
7		7	100	10^{-3}	Voz, Vídeo (<i>Live Streaming</i>) Jogos interativos
8		8	300	10^{-6}	Vídeo (<i>Buffered Streaming</i>)
9		9	300	10^{-6}	Serviços baseados em TCP

▪ GBR (*Guaranteed Bit Rate*) e MBR (*Maximum Bit Rate*)

O parâmetro GBR identifica a taxa de bits que deve ser garantida para um GBR *bearer*, enquanto que o parâmetro MBR estabelece a máxima taxa de bits permitida para o GBR *bearer*. Neste trabalho considera-se GBR=MBR [10].

O algoritmo implementado na eNodeB, chamado QoS Aware, é baseado no algoritmo de prioridade ponderada (*Weighted Priority Algorithm*) [11]. Este algoritmo proprietário basicamente calcula a prioridade ponderada para cada *bearer* criado, levando-se em conta aspectos relacionados à modulação, classe de serviço, atraso e priorização de tráfego.

Uma vez realizada a atribuição de prioridade aos *bearers*, a alocação de recursos a eles é feita seguindo esta ordem de prioridade, até que todos os *bearers* sejam atendidos ou até que todos os recursos se esgotem.

IV. MOS (*MEAN OPINION SCORE*)

MOS é um método subjetivo de medida de qualidade de voz, definido pela norma P.800 do ITU-T [12]. A qualidade de voz transmitida por um dispositivo e recebido 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”.

A ferramenta de testes utilizada para os testes de desempenho do serviço VoIP emprega o algoritmo *E-Model*, definido pela norma ITU-T G.107 [13] para estimar a qualidade MOS para cada par de pontos de terminação. Na Tabela II são apresentados os valores referentes a MOS resultantes da aplicação deste algoritmo.

TABELA II. PONTUAÇÃO MOS [13]

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

V. TESTES DE DESEMPENHO VOIP

Com o objetivo de verificar o comportamento de chamadas VoIP na rede LTE, foi montado um ambiente controlado de testes no laboratório contendo os dispositivos reais da rede LTE conforme mostrado na Figura 1. Para garantir a ausência de interferência externa, a *eNodeB* e o terminal *UE* foram conectados através de cabos de RF.

Para os testes em questão foram considerados os valores de largura de banda de 5 MHz, faixa de frequência de operação de 450 a 470 MHz, modulação 16-QAM e 25 blocos de recursos (*resource blocks*).

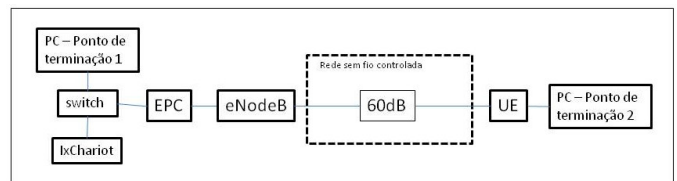


Fig. 1. Cenário utilizado para obtenção dos valores para os parâmetros de desempenho.

A topologia de testes consiste de dois *PCs* (*Personal Computers*) que hospedam os pontos de terminação monitorados pela ferramenta de testes *IxChariot* [14]. Esses pontos de terminação são responsáveis pelo envio do tráfego RTP [15]. O ponto de terminação 1 e o ponto de terminação 2 são referentes à EPC e ao UE, respectivamente. Na rede onde está conectada a EPC, se encontra o PC que hospeda a ferramenta *IxChariot* utilizada para a geração dos tráfegos e medições dos parâmetros de desempenho e medidas de MOS. Conectada a esta EPC se encontra a *eNodeB*, que por sua vez se intercomunica com o UE.

Os testes de desempenho do tráfego VoIP foram realizados considerando cenários de teste caracterizados a partir da configuração de determinados parâmetros pertencentes aos dispositivos que constituem a rede LTE. A Tabela III descreve estes cenários.

TABELA III. CENÁRIOS DE TESTE

Cenário 1	<p><u>Dedicated bearer:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • QCI = 1 (GBR) • Escalonador com QoS Aware Weighted Priority (WP) • Tráfego RTP com taxa de bits variável (256, 640 e 1280 kbps) <p><u>Default Bearer:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • QCI = 7 (non-GBR) • Taxa máxima limitada à rede • Escalonador com QoS Aware • Sem tráfego
Cenário 2	<p><u>Dedicated bearer:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • QCI = 1 (GBR) • Escalonador com QoS Aware Weighted Priority (WP) • Tráfego RTP com taxa de bits variável (256, 640 e 1280 kbps)

	<p><u>Default Bearer:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • QCI = 7 (non-GBR) • Escalonador com QoS Aware • Com tráfego TCP com taxa máxima de 7 Mbps
Cenário 3	<p><u>Dedicated bearer:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • QCI = 8 (non-GBR) • Escalonador com QoS Aware Weighted Priority (WP) • Tráfego RTP com taxa de bits variável (256, 640 e 1280 kbps) <p><u>Default Bearer:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • QCI = 7 (non-GBR) • Taxa máxima limitada à rede • Escalonador para QoS Aware • Sem tráfego
Cenário 4	<p><u>Dedicated bearer:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • QCI = 8 (non-GBR) • Escalonador com QoS Aware Weighted Priority (WP) • Tráfego RTP com taxa de bits variável (256, 640 e 1280 kbps) <p><u>Default Bearer:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • QCI = 7 (non-GBR) • Taxa máxima (MBR) de 7 Mbps • Escalonador com QoS Aware Weighted Priority (WP) • Com tráfego TCP com taxa máxima de 7 Mbps

Todos os testes foram realizados para quantidades de 4, 10 e 20 pares de conversação RTP, correspondentes a 4, 10 e 20 chamadas de voz simultâneas codificadas através do *codec* G.711 e gerados a partir da ferramenta de testes *IxChariot*, trafegando através de um *dedicated bearer* com taxa variável de bits de 256, 640 e 1280 kbps.

Para os testes em questão foi configurado um *default bearer* com QCI=7, do tipo non-GBR.

Nos cenários de teste 1 e 2 o *dedicated bearer* foi configurado com QCI=1 (tipo GBR) e nos cenários 3 e 4 o *dedicated bearer* foi configurado com QCI=8 (tipo non-GBR).

Para os cenários de teste 1 e 3, o *default bearer* não foi utilizado, de modo que o tráfego gerado no *dedicated bearer* não sofresse concorrência, caracterizando a condição de ausência de congestionamento.

Foi utilizado o aplicativo *iperf* [16] para gerar um tráfego TCP de 7 Mbps para o cenário 2 e outro de 7 Mbps, para o cenário 4.

O tráfego TCP gerado através do *default bearer* para o cenário 2 correspondeu ao valor suportado pelo canal LTE utilizado. Deste modo, foi assegurado que no *default bearer* havia tráfego concorrente com o *dedicated bearer* em uma condição de congestionamento, a fim de verificar o comportamento ao utilizar o *escalonador* com QoS aware *Weighted Priority* (WP).

Para o cenário 4, o tráfego gerado no *default bearer* 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.

Ao final de cada teste foram registrados os valores dos parâmetros de desempenho relativos a MOS, latência e *jitter* para as diferentes quantidades de chamadas.

VI. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS TESTES

Foram realizados testes para verificação da implementação do algoritmo *QoS Aware Weighted Priority* (WP) para a manutenção da qualidade do serviço VoIP sobre LTE em conformidade com o padrão 3GPP.

No cenário 1 os testes mostraram na prática a garantia de banda e priorização das mensagens RTP com uso dos recursos de tipo GBR para o QCI=1 sobre as mensagens RTP com uso de QCI=7 (non-GBR). Ao mudar o *dedicated bearer* para uso de QCI=8 para o encaminhamento de mensagens RTP, conforme cenário 3, verificou-se que este QCI não permitiu a garantia de banda nem a priorização sobre o tráfego TCP que utilizava o QCI=7. Estes resultados estão de acordo com as especificações de QoS do padrão 3GPP.

Como resultados quantitativos, a Figura 2 e a Figura 3 apresentam os resultados dos testes comparativos entre os cenários 2 e 4, com 3 diferentes quantidades de pares de conversação RTP. Esta variação no número de pares permitiu a avaliação dos valores de MOS e *jitter* nas condições de pouca ocupação (4 pares), média ocupação (10 pares) e alta ocupação (20 pares) de banda, comparando-se situações com uso de QCI=1 (GBR) e QCI=8 (non-GBR) para os *dedicated bearers* utilizados para o encaminhamento das mensagens RTP. Para ambos os cenários foram utilizados tráfegos concorrentes TCP nos *default bearers* com QCI=7. Foram realizadas três medidas para cada um dos pares, sendo apresentadas nas figuras as médias aritméticas dessas medições.

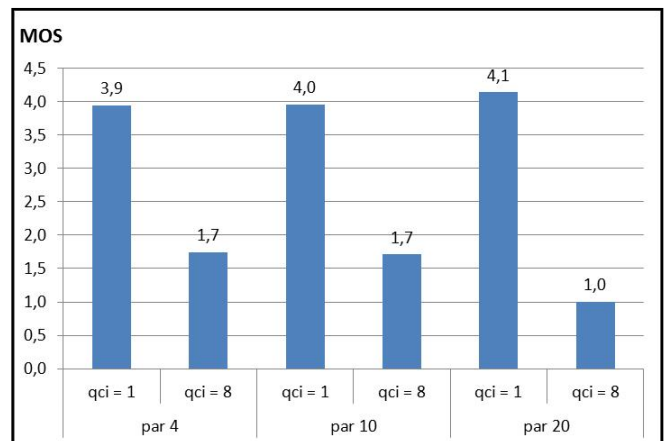


Fig. 2. Valores obtidos de MOS para os cenários de teste.

A Figura 2 apresenta os resultados dos valores de MOS com QCI=1 comparados com os valores de MOS com QCI=8, para as 3 diferentes quantidades de pares de conversação. Verifica-se que para QCI=1, com pouca ocupação (4 pares), o valor de MOS de 3,9 é considerado satisfatório tendo-se como referência os valores da Tabela II e apresenta pouca variação com o aumento do número de pares de conversação. Já para QCI= 8, verifica-se uma degradação significativa da qualidade de voz para as diferentes quantidades de pares de conversação.

Para a verificação do comportamento do uso de *bearers* GBR e non-BGR foram analisadas as variações relativas de latência e *jitter* mostradas na Figura 3 e calculadas através da fórmula (1).

$$Var(\%) = \frac{V_{par-x} - V_{par-4}}{V_{par-4}} \quad (1)$$

Onde:

Var(%): Variação relativa em relação ao par 4.

V_{par_x} : Valor para o atraso fim a fim, atraso em um sentido ou jitter para os pares x.

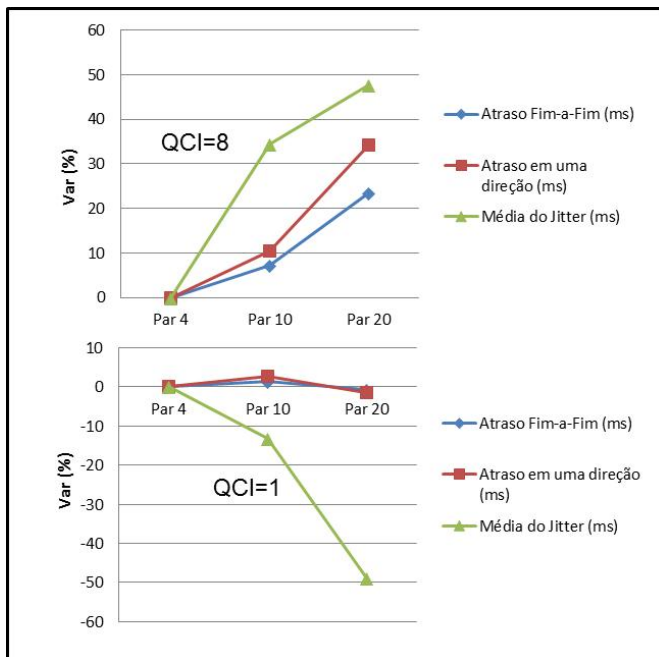


Fig. 3. Variação relativa de latência e jitter para QCI= 1 e QCI= 8 com relação ao par 4.

Os resultados mostram qualitativamente que a manutenção da qualidade VoIP é expressivamente melhor com o uso de QCI=1 comparativamente com o uso de QCI=8, pois observa-se que para QCI=8, conforme o número de pares de conversação aumenta, a latência e o jitter aumentam, enquanto que para o QCI=1, há pouca variação da latência e diminuição do jitter. Isto mostra que, nas situações de gargalo, se verifica a grande diferenciação do uso deste QCI=1 para a manutenção da qualidade VoIP.

VII. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizados testes de desempenho em um sistema LTE 450 MHz real em ambiente de laboratório.

O uso de escalonador com QoS Aware Weighted Priority (WP) implementado na eNodeB mostrou-se efetivo nas configurações de dedicated bearer com esquema de tráfego com banda garantida (GBR) com uso de QCI=1, permitindo a manutenção da qualidade VoIP mesmo em condições de gargalo.

Os resultados obtidos nos testes apresentam conformidade com os padrões de QoS definidos pelo 3GPP.

Como trabalhos futuros, novos testes serão realizados levando-se em conta variáveis importantes, tais como novos codecs utilizados pela tecnologia LTE, outros mecanismos de

controle de QoS para VoIP em LTE e diferentes tipos de modulação, com a intenção de verificar a robustez da tecnologia em cenários de aplicação com mobilidade dos terminais UE e com a presença de interferências.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao governo brasileiro que através do FUNTTEL – Fundo para o Desenvolvimento Tecnológico das Telecomunicações financia o Projeto LTE 450, conduzido pelo CPqD.

Referências

- [1] CPqD et al., "New work item proposal: Introduction of LTE 450 in Brazil", 3GPP TSG-RAN WG4 Meeting #57, RP-121414, Chicago, USA, 4-7th September, 2012.
- [2] CPqD et al., "TP on frequency band arrangement", 3GPP TSG-RAN WG4 Meeting #67, R4-133076, Fukuoka, Japan, 20 - 24 May, 2013.
- [3] Quality of Service (QoS) in LTE. Disponível em <http://4g-lte-world.blogspot.com.br/2013/01/quality-of-service-qos-in-lte.html>. Acesso em 07/05/2013.
- [4] 3GPP TS 23.401, LTE; General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access (Release 8), v. 8.8.0, January 2010.
- [5] 3GPP TS 36.300, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 8), v.8.12.0, March 2010.
- [6] Md. Ebna Masum, Md. Jewel Babu. "End-to-End Delay Performance Evaluation for VoIP in the LTE network". Blekinge Institute of Technology, June 2011.
- [7] Jani Puttonen et al., "Persistent Packet Scheduling Performance for Voice-over-IP in Evolved UTRAN Downlink", Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. IEEE PIMRC 2008, pp. 1,6, 15-18 Sept. 2008.
- [8] Jani Puttonen et al., "Voice-over-IP Performance in UTRA Long Term Evolution Downlink", Vehicular Technology Conference, 2008. IEEE VTC Spring 2008, pp. 2502,2506, 11-14 May 2008.
- [9] Anatel, Resolução nº 558, publicada em 24/12/2010. Disponível em <http://legislacao.anatel.gov.br/resolucoes/2010/24-resolucao-558>.
- [10] 3GPP TS 23.203, Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Policy and charging control architecture (Release 8), v. 8.8.0, January 2010.
- [11] Developing a QoS aware framework for LTE 4G: Aricent Group. Disponível em <http://www.telecomlead.com/whitepaper/developing-a-qos-aware-framework-for-lte-4g-aricent-group/>. Acesso em: 15/05/2013.
- [12] ITU-T P.800 Methods for subjective determination of transmission quality. Disponível em <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.800-199608-I>. Acesso em 11/05/2013.
- [13] ITU-T G.107 The E-model: a computational model for use in transmission planning. Disponível em <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.107-201112-I/en>. Acesso em 11/05/2013.
- [14] IxChariot® User Guide Release 7.10 913-0949-04 Rev. A. Disponível em <http://www.netcor.de/download.php?file=1966>. Acesso em 25/04/2013.
- [15] RFC 3550 "RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications", July 2003. Disponível em <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3550.txt>. Acesso em 10/05/2013.
- [16] Iperf. Disponível em <http://iperf.sourceforge.net/>. Acesso em 09/05/2013.