

Desempenho de aplicações de vídeo em tecnologia LTE usando *Relay Nodes* de tipo 1.a

Cesar A. Sierra e José Roberto B. de Marca

Resumo—O aumento de tráfego de vídeo nas redes móveis, impõe novos requisitos às taxas de transmissão e maiores restrições aos atrasos. A tecnologia LTE surge como capaz de atender essa demanda, no entanto, devido à natureza das redes celulares, os terminais na borda da célula têm dificuldade para conseguir os níveis de SINR apropriados. Para solucionar este problema, em *LTE-Advanced* se permite a inclusão de nós de retransmissão (RN) na arquitetura da rede. Neste estudo, é avaliado através de simulações o desempenho de vídeo em tempo real com o uso de RN em LTE, evidenciando a melhora na qualidade percebida pelos usuários da borda.

Palavras-Chave—Sistemas LTE; Nós de retransmissão; Avaliação de desempenho; Vídeo em tempo real; QoS; QoE.

Abstract—Video traffic increase in mobile networks, impose new requirements in terms of bitrate and delay. LTE technology appears capable of facing this demand challenges. However, given the inherent nature of the mobile networks, the devices located at the cell's edge face difficulties to achieve the required SINR. To overcome this issue, LTE Advanced includes Relay Nodes (RN) as part of the network architecture. The present work evaluates, through simulations, the performance of real time video using LTE and Relay Nodes. The results highlight the enhanced quality of video obtained at the receiver's side.

Keywords—LTE systems; Relay Nodes; Performance evaluation; Real time video; QoS; QoE

I. INTRODUÇÃO

A evolução dos serviços de telecomunicações tem sido um dos fatores chave para o constante desenvolvimento de novas tecnologias de comunicações móveis. Desde uma primeira fase baseada em serviços de voz, passando pela atual, onde o tráfego de dados é dominante, com a aparição de novos dispositivos móveis (*smartphones* e *tablets*) com altas capacidades de processamento e telas adequadas para a reprodução de conteúdos multimídia, se prevê uma próxima geração onde dominarão os serviços baseados em vídeo. Esta afirmação advém de várias análises, entre elas aquela feita pela CISCO [1], a qual afirma que mais da metade do tráfego móvel em 2012 foi proveniente de serviços de vídeo, correspondendo a 51% da totalidade da informação trafegada pelas redes sem fio. Além disso é estimado um crescimento de 16 vezes do tráfego de vídeo até 2017, quando deverá representar 66% do total de tráfego de dados móvel mundial.

Focando a atenção na evolução das tecnologias propostas na área de redes celulares pelo grupo 3GPP, principalmente nas tecnologias LTE e LTE-Advanced, é importante conhecer tanto as possibilidades quanto as limitações destas técnicas para a transmissão de vídeo, com a finalidade de prevenir eventos de

saturação e preservar a qualidade na comunicação. Um dos principais problemas das redes celulares, é garantir qualidade de serviço aos usuários localizados na borda da célula, onde a relação SINR (Sinal Ruído + Interferência) é baixa. Por isto, no processo de padronização de *LTE-Advanced* foi definido o uso de técnicas de *Relaying* para melhorar as condições do canal destes usuários, aumentando a cobertura e a vazão nesta zona, melhorando assim a capacidade do sistema em geral.

O objetivo deste trabalho é avaliar mediante experimentos de simulação, o desempenho de serviços de vídeo em tempo real sobre redes LTE no enlace descendente, analisando as capacidades e limitações do sistema, assim como também avaliando as melhoras introduzidas pela implementação das técnicas de *relaying*, em particular analisando o desempenho de usuários próximos da borda da célula. São empregadas métricas apropriadas para a avaliação da qualidade experimentada por usuários (*QoE - Quality of Experience*) de serviços de vídeo, tais como a PSNR (*Peak Signal to Noise Ratio*) e a MOS [2] (*Mean Opinion Score*) além de medidas de desempenho mais comuns para mensurar a qualidade de serviço (*QoS - Quality of service*) da rede como a perda de pacotes.

A. Trabalhos Relacionados

O aumento da popularidade de aplicações de vídeo em dispositivos móveis tem atraído o interesse da indústria e da comunidade acadêmica, gerando varias pesquisas nesta área nos últimos anos. Focando a atenção no vídeo sobre tecnologias LTE, Oyman e colaboradores [3], ressaltam a importância de conhecer as potencialidades e limitações das novas tecnologias sem fio (Wimax e 3GPP) com a finalidade de evitar eventos de saturação. Para isto utilizaram métodos analíticos estimando a capacidade do sistema. Seguindo o mesmo objetivo, em [4], Talukdar e colaboradores realizaram simulações a nível de sistema para determinar a capacidade do enlace descendente da interface ar LTE, avaliando o número máximo de terminais que podem ser atendidos simultaneamente. Os trabalhos mencionados anteriormente avaliam o desempenho geral da célula unicamente através de métricas de QoS, sem avaliar o funcionamento do UE da borda. Já na área dos *Relay Nodes* (RN), dado que estes são um dos fatores chave em LTE-A, diversos estudos têm sido realizados procurando evidenciar a melhoria fornecida por estes dispositivos no aumento da capacidade e cobertura da célula, e também apresentando análises do número de RN e posições ótimas, utilizando geradores de tráfego acima da camada 2 no *eNode-B*. Poucos trabalhos avaliaram a transmissão de vídeo, dentre eles, em [5] Thiago de Moraes e colaboradores,

propõem métodos para a alocação de recursos com a utilização de RN *in-band*, no entanto, o vídeo foi emulado como uma transmissão de pacotes de tamanho constante, pelo qual, os resultados são avaliados apenas através de métricas de QoS.

B. Contribuição

No desenvolvimento desta pesquisa, não foram encontradas ferramentas de acesso público que permitam simular o uso de RNs em tecnologia LTE. Consequentemente, baseando-se no simulador de código aberto “*LTE-Sim*” [6] e conforme as recomendações definidas no padrão do 3GPP [7] [8], foram modeladas e desenvolvidas classes que emularam o funcionamento dos RNs, possibilitando a integração destes nós nos cenários de simulação. Adicionalmente, foi desenvolvida uma interface entre as ferramentas “*Evalvid*” [9] e “*LTE-Sim*” que permitiu emular tráfego de vídeo H.264/AVC em tempo real e avaliar seu desempenho mediante métricas associadas a qualidade da experiência. O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: A seção 2 apresenta alguns conceitos básicos do uso de RN em LTE-A. A seção 3 detalha o modelo de simulação, incluindo os desenvolvimentos de *software* realizados, os parâmetros utilizados para a simulação do E-UTRAN e uma descrição dos cenários avaliados. A seção 4 apresenta os resultados obtidos, enquanto a seção 5 finaliza o artigo, apresentando as conclusões e indicações sobre possíveis trabalhos futuros.

II. RN EM TECNOLOGIA LTE-Advanced

Um RN é um tipo de estação rádio-base de baixa potência que procura melhorar a cobertura da rede e/ou a vazão dos usuários na borda da célula sem precisar de uma ligação dedicada (p.e. por fibra ótica). Para isto, o RN é ligado à rede através de uma estação base conhecida como *Donor eNB (DeNB)*, usando os mesmos protocolos e recursos rádio da célula. Na Figura 1 é ilustrada a utilização do RN em LTE-A e a terminologia adotada no presente artigo. O enlace entre o DeNB e o RN é chamado de *Backhaul Link (BL)* e utiliza a interface U_n que é uma modificação da interface U_u especificada para o E-UTRAN, para a comunicação entre uma rádio-base (eNB) e o terminal de usuário, enquanto que o enlace entre o RN e o UE é chamado de *Access Link (AL)* usando a interface U_u .

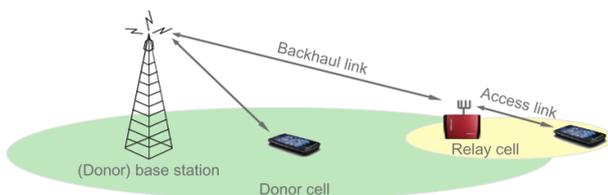


Fig. 1. Arquitetura para uso dos *Relay Nodes*: enlaces AL e BL [10]

O 3GPP define o uso de RNs para o LTE versão 10, realizando uma classificação em 2 tipos conforme às estratégias utilizadas pelo RN para se comunicar com os terminais (UE) em sua área de cobertura. Os RNs de tipo 1 (de camada 3)

são caracterizados por possuir seu próprio identificador físico de rede, incluindo a transmissão dos seus próprios canais de sincronização e símbolos de referência. De acordo com a estratégia utilizada para conseguir o isolamento entre o AL e o BL estes RN são subdivididos em 3 subtipos: RN de tipo 1 (comunicação *half-duplex, in-band*), de tipo 1.a (comunicação *full-duplex, out-band*) e de tipo 1.b (comunicação *full-duplex, in-band*). Já os RNs de tipo 2, não possuem seu próprio identificador de rede, sendo transparentes para os UEs.

III. MODELO DE SIMULAÇÃO

A avaliação de resultados foi feita através de simulações ao nível do sistema. Para isto, a ferramenta de código aberto *LTE-Sim* foi adaptada para incluir RNs nos cenários de simulação. A seguir serão apresentados os desenvolvimentos realizados, o modelo do tráfego e os parâmetros utilizados na simulação do E-UTRAN.

A. Desenvolvimentos realizados

1) *Implementação dos Relay Nodes*: Foram desenvolvidas classes e métodos para incluir no *LTE-Sim* RNs do tipo 1.a (*out of band*) conforme as especificações e funcionalidades definidas no padrão do 3GPP. Dado que neste tipo de RN o enlace eNB-RN funciona em uma portadora diferente do enlace RN-UE, o isolamento entre eles ocorre no domínio da frequência permitindo sua operação nos mesmos instantes de tempo. Consequentemente, a implementação deste tipo de nó não requer mudanças adicionais nos protocolos rádio definidos na versão 8 do LTE. Este nó foi modelado como uma combinação entre um UE e uma eNB, devido a que apresenta um comportamento dual. Quando o RN interage com o DeNB no enlace BL, este atua como se fosse um UE, porém, quando se comunica com os usuários no enlace AL este assume as funções de um eNB convencional. A figura 2 apresenta o esquema lógico do RN desenvolvido e os protocolos envolvidos no plano de usuário.

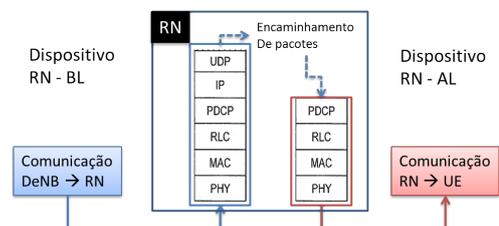


Fig. 2. Esquema do RN desenvolvido (plano de usuário)

2) *Integração LTE-Sim / Evalvid*: Com a finalidade de avaliar o desempenho dos fluxos de vídeo e analisar métricas de QoE, realizou-se a integração entre as ferramentas *LTE-Sim* e *Evalvid*. A partir de um arquivo real de vídeo, *Evalvid* fornece o *Video Trace File* que contém os detalhes dos pacotes a ser transmitidos na rede simulada pelo *LTE-Sim*. Como resultado da Simulação é obtido um arquivo que inclui todos os eventos ocorridos que serão utilizados pelo *Evalvid* para calcular atrasos, taxas de perda de pacotes e as métricas de QoE. A Figura 3 ilustra os módulos desenvolvidos na

interface entre as ferramentas *Evalvid* e *LTE-Sim* assim como o procedimento geral utilizado para avaliar as métricas de QoE. O módulo de Ajuste encaixa o *Video Trace File* num tipo de formato legível pelo *LTE-Sim*, enquanto que o módulo de análise cria os arquivos com os registros da transmissão e recepção dos pacotes requeridos pelo *Evalvid* para reconstruir o vídeo recebido pelo usuário e calcular posteriormente as métricas de desempenho.

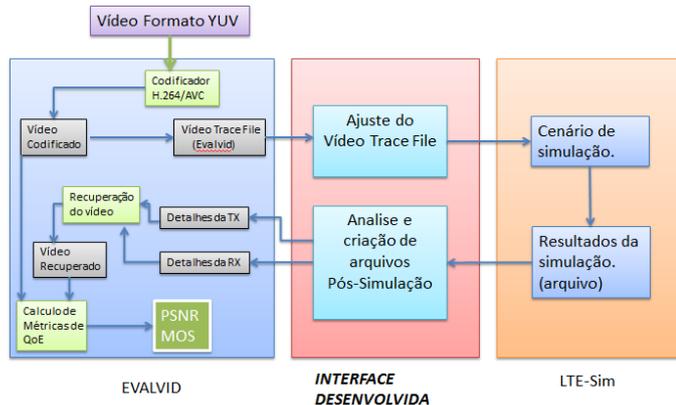


Fig. 3. Processo utilizado para a avaliação do vídeo recebido

Finalmente, foram realizados testes de validação dos módulos desenvolvidos. Especificamente, para validar a simulação do vídeo sobre LTE, utilizou-se como referência a pesquisa feita pela Motorola, relatada em [4], obtendo resultados semelhantes.

B. Modelo do tráfego

O tráfego de informação é modelado a partir de um arquivo real de vídeo através da obtenção de arquivos de rastreamento (*trace files*). Estes arquivos não contêm o fluxo de vídeo codificado, em vez disso, fornecem uma caracterização, proporcionando os tempos de transmissão e as quantidades (em bytes) requeridas para simular o transporte do fluxo numa rede de comunicações. Para a obtenção dos arquivos de rastreamento utilizou-se o vídeo de referência “Highway” disponível em [11], em formato YUV e resolução CIF (*Common Intermediate Format*) 352x288 pixels, o qual foi posteriormente codificado no padrão H.264/AVC com o uso da ferramenta *Evalvid*.

C. Parâmetros de simulação do E-UTRA

A tabela I apresenta os principais parâmetros utilizados na simulação do E-UTRAN. Estes valores foram baseados nos modelos definidos pelo 3GPP para a simulação de sistemas heterogêneos, especificamente para o caso 1 (Macro-célula urbana + *outdoor Relay*, tabela A.2.1.1.2-3 em [8]). Foram utilizados modelos de perdas de propagação sem visada direta para os enlaces entre o eNB e UEs e entre RN e UE, enquanto que para o enlace entre o eNB e RN se utilizou o modelo com visada direta.

D. Experimentos de Simulação

Os experimentos desenvolvidos procuram comparar o desempenho da rede e do usuário da borda da célula sem/com a

TABELA I
PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO DO E-UTRAN

Parâmetro	Valor
frequência de portadora	2 Ghz
largura de banda - eNB	10 Mhz
largura de banda - RN	3 Mhz
potência de transmissão do eNB	46 dBm
potência de transmissão do RN	30 dBm
perdas de propagação eNB - UE	$131.1 + 42.8\log_{10}(R)$
perdas de propagação eNB - RN	$100.7 + 23.5\log_{10}(R)$
perdas de propagação RN - UE	$145.4 + 37.5\log_{10}(R)$
perdas de penetração	20 dB

utilização do RN. Cada cenário é composto por uma célula de 300 metros, uma eNB, um número variável entre 30 e 50 M-UEs (UEs ligados à eNB), um RN e um R-UE (UE ligado ao RN). Os M-UE são uniformemente distribuídos e se movimentam a uma velocidade de 3 Km/h usando o modelo de mobilidade aleatória (*Random Walk Mobility Model*). Cada UE recebe um fluxo de vídeo com duração de 80 segundos, o qual é iniciado em tempos diferentes de forma aleatória (entre 1 e 10 segundos). O tempo de simulação de cada experimento é de 90 segundos e os resultados são obtidos pela média de 5 simulações.

1) *Experimento 1*: Neste experimento um RN é localizado a 40 metros antes da borda da célula. O objetivo é determinar o comportamento da rede e de um usuário localizado na borda da célula quando todos os UE se encontram recebendo simultaneamente vídeo codificado a 256 kbps.

2) *Experimento 2*: Neste experimento avalia-se o desempenho do UE na borda da célula (com e sem o uso do RN) quando este recebe vídeo codificado a 512 kbps enquanto um número variável de M-UEs recebem vídeo codificado a 256 kbps.

IV. AVALIAÇÃO DE RESULTADOS

A. Avaliação da QoS

Serão apresentados os resultados obtidos em termos de perda de pacotes para os experimentos descritos na seção anterior. Estes são ilustrados em Figuras que representam os valores obtidos para (a) a totalidade de usuários e (b) o usuário próximo da borda da célula. Dado que os valores obtidos para a métrica do atraso não ultrapassaram 200 ms (não sendo considerados prejudiciais para o desempenho do vídeo em tempo real), os detalhes destes resultados não serão relatados neste artigo.

1) *Experimento 1*: A Figura 4.a apresenta a relação entre a percentagem média de perda de pacotes da célula e o número de usuários que se encontram recebendo tráfego de vídeo. Nesta Figura, pode-se observar que a partir dos 40 usuários a perda de pacotes é superior ao 1% quando a taxa de codificação de vídeo empregada é de 256 Kbps. Este resultado é similar ao encontrado na pesquisa feita pela Motorola. Focando a atenção no desempenho do usuário da borda da célula, na Figura 4.b pode-se observar como a perda de pacotes aumenta acima da média, e como através do uso do RN é possível manter a esta perda em valores muito pequenos inclusive em situações de congestão (50 UEs).

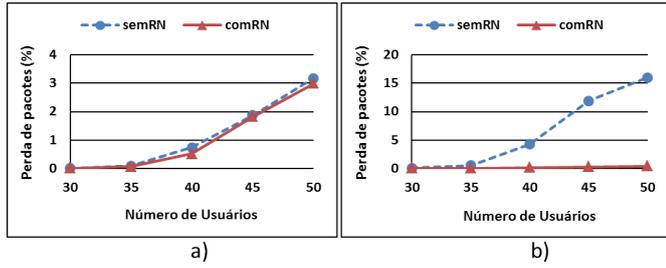


Fig. 4. Perda de pacotes no experimento 1 a) médio da rede e b) usuário próximo da borda da célula.

2) *Experimento 2*: Os resultados observados na Figura 5 apresentam uma tendência similar à observada no experimento 1. No entanto, dado que o UE da borda recebe uma taxa de transmissão maior que os demais UEs causa uma perda de pacotes maior à medida que o número de terminais ativos na célula aumenta, sendo esta queda mais acentuada para o caso “sem RN”. Ao contrario do resultado no experimento 1, neste caso o uso do RN não consegue manter o desempenho do UE da borda no seu maior valor a partir dos 40 UE. Isto acontece porque o agendador de pacotes na camada MAC, do tipo *Proportional Fair* (PF), faz um compartilhamento mais justo dos recursos dando maior prioridade a aqueles terminais que até um determinado momento transmitiram uma menor quantidade de dados.

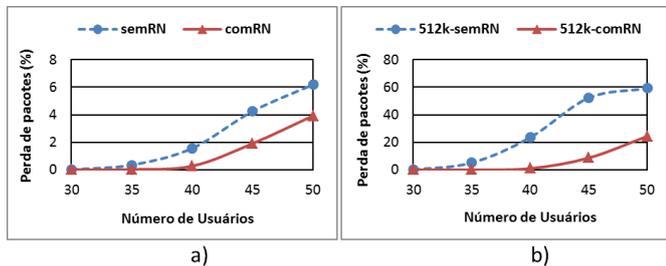


Fig. 5. Perda de pacotes no experimento 2 a) médio da rede e b) usuário próximo da borda da célula.

B. Avaliação da QoE

Esta análise foi feita mediante o uso da métrica objetiva PSNR, utilizada para descrever a distorção visual causada pela perda de pacotes, definida como a razão entre a máxima energia possível e o ruído que afeta a representação do sinal entre os quadros de vídeo original e recebido. Posteriormente, conforme com a tabela II recomendada em [12], os valores obtidos para a PSNR foram mapeados para o MOS, métrica que descreve de forma quantitativa a opinião subjetiva do usuário sobre a qualidade do vídeo avaliado.

1) *Experimento 1*: Os parâmetros de QoE foram avaliados apenas para o UE da borda da célula com/sem a utilização do RN. A Figura 6 ilustra a relação entre a PSNR média obtida pelo UE avaliado e a quantidade de UEs que se encontram recebendo vídeo simultaneamente na célula. Da mesma forma como foi visto na avaliação da perda de pacotes, pode-se observar que sem o uso do RN, o aumento do tráfego degrada

TABELA II
MAPEAMENTO DO PSNR PARA O MOS

PSNR	MOS equivalente
> 37	5 - Excelente
31 - 37	4 - Bom
25 - 31	3 - Razoável
20 - 25	2 - Pobre
< 20	1 - Ruim

a qualidade do vídeo recebido por este UE passando de uma qualidade razoável com 40 UE para uma qualidade pobre com 50 UE. Já com o uso do RN, a PSNR média mantém-se em um valor constante de 31.17 dB, equivalente à mesma qualidade (boa) do vídeo transmitido.

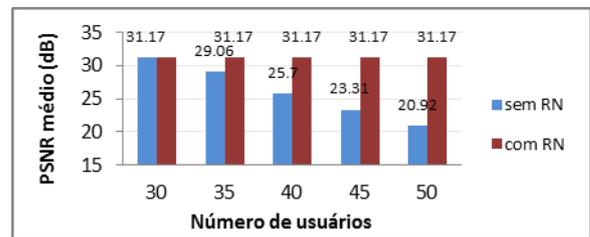


Fig. 6. PSNR média obtida pelo UE da borda da célula no experimento 1

A Figura 7 apresenta de forma detalhada a percentagem de quadros de vídeo recebidos com um determinado MOS para o cenário sem RN. Nesta Figura, a primeira coluna corresponde ao vídeo de referência e representa o vídeo a ser transmitido. Pode-se observar a degradação causada pelo esquema de codificação, resultando um vídeo com o 51.8% e 41.9% dos quadros com um MOS bom e razoável, respectivamente. As colunas seguintes representam o vídeo recebido pelo UE da borda da célula a medida que o número de terminais ativos aumentam. Pode-se observar a influência da perda de pacotes na diminuição do percentagem de quadros com um MOS bom e o aumento de quadros com um MOS ruim.

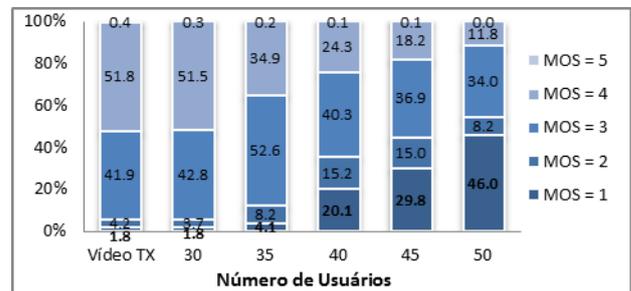


Fig. 7. Valores de MOS obtidos pelo UE da borda da célula sem o uso do RN no experimento 1

2) *Experimento 2*: A Figura 8 ilustra para os cenários com e sem RN, a PSNR média obtida pelo UE próximo da borda da célula quando este recebe tráfego de vídeo codificado a 512 kbps enquanto que os UE restantes recebem vídeo codificado a 256 kbps. Pode-se observar a influencia da perda de pacotes na qualidade do vídeo recebido, a qual decresce de uma forma mais acentuada à medida que o número de UE aumenta ao

ser comparada com os resultados obtidos no experimento 1. Como foi evidenciado na avaliação da perda de pacotes, o uso do RN, não conseguiu manter a qualidade no seu maior valor a partir dos 40 UE, no entanto, foram apresentados ganhos significativos em comparação com o cenário sem o uso do RN.

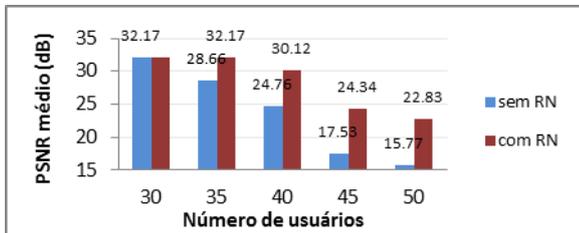


Fig. 8. PSNR média obtida pelo UE da borda da célula no experimento 2

As Figuras 9 e 10 ilustram detalhadamente a percentagem de quadros do vídeo recebido com um determinado MOS sem e com o uso do RN. Pode-se notar que sem o uso do RN a qualidade do vídeo decresce rapidamente com o incremento do número de UEs na célula, já para 50 UEs, o vídeo observado pelo terminal próximo da borda da célula apresenta um 59.1% dos quadros com MOS ruim e apenas o 2.5% dos quadros com MOS bom.

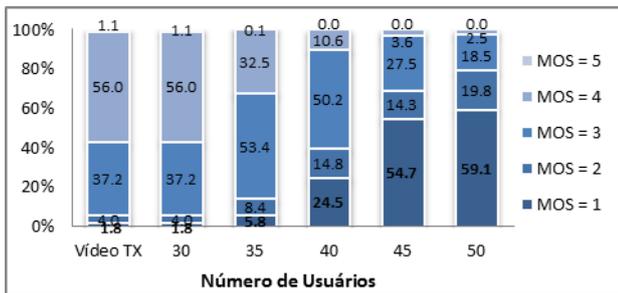


Fig. 9. Valores de MOS obtidos pelo UE da borda da célula sem o uso do RN no experimento 2

Para este experimento, com o uso do RN, pode-se observar que o vídeo recebido conserva a mesma qualidade do vídeo transmitido até a existência de 35 terminais ativos, apresentando 56% dos quadros com MOS bom e ainda 37.2% dos quadros com MOS razoável. Já para um número maior de UEs existe uma degradação em relação ao vídeo transmitido, sendo que no caso de 50 UEs a percentagem de quadros com MOS bom é reduzida a 8% e número de quadros com MOS ruim aumentou para 24.8%, ainda assim muito melhor desempenho que no caso sem RN.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo foi avaliado o desempenho de aplicações de vídeo em tempo real no enlace descendente em LTE com utilização de RNs. Os resultados das simulações ressaltam a efetividade dos RNs para manter uma alta qualidade do vídeo percebido pelos usuários na borda da célula inclusive em condições de congestão (em relação a qualidade do vídeo transmitido). Estas melhoras introduzidas pelo RN

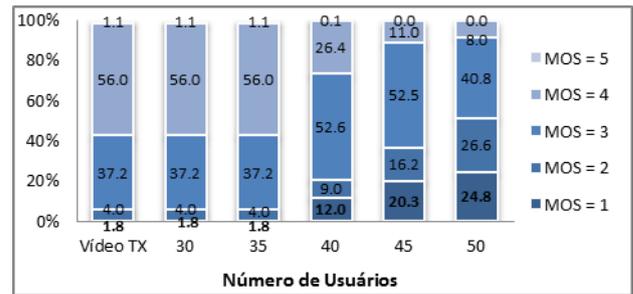


Fig. 10. Valores de MOS obtidos pelo UE da borda da célula com o uso do RN no experimento 2

decorrem da melhoria dos níveis de SNR percebidos pelos usuários, influenciando diretamente nas estratégias de agendamento de pacotes (*packet scheduling*) e na designação de esquemas de modulação/codificação adaptativos, resultando em ganhos significativos na qualidade do vídeo recebido. Pelo que foi apresentado, pode-se afirmar que os RNs terão um papel fundamental na evolução dos serviços de vídeo em *LTE-Advanced*, devido às suas funcionalidades, que permitem realizar uma distribuição mais uniforme dos recursos da célula. Como trabalho futuro se propõe estender os experimentos apresentados neste artigo, considerando cenários multi-célula e com múltiplos RNs, para avaliar os efeitos das possíveis interferências e seu impacto no funcionamento do sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] CISCO, Cisco Visual Networking Index; Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2012-2017, Feb. 2013.
- [2] Recommendation, I. T. U. R. B. T. "500-11, Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures." International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland (2002).
- [3] Oyman, O.; Foerster, J.; Yong-joo Tcha; Seong-Choon Lee, "Toward enhanced mobile video services over WiMAX and LTE [WiMAX/LTE Update]", Communications Magazine, IEEE, vol.48, no.8, pp.68,76, August 2010.
- [4] Talukdar, A.; Cudak, M.; Ghosh, A., "Streaming Video Capacities of LTE Air-Interface," Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on, vol., no., pp.1,5, 23-27 May 2010
- [5] Moraes, Thiago Martins de; Bauch, Gerhard; Seidel, Eiko, "QoS-aware Scheduling for In-Band Relays in LTE-Advanced," Systems, Communication and Coding (SCC), Proceedings of 2013 9th International ITG Conference on, vol., no., pp.1,6, 21-24 Jan. 2013
- [6] Piro, G.; Grieco, L.A.; Boggia, G.; Capozzi, F.; Camarda, P., "Simulating LTE Cellular Systems: An Open-Source Framework," Vehicular Technology, IEEE Transactions on, vol.60, no.2, pp.498,513, Feb. 2011
- [7] 3GPP TR36.806 V9.0.0, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Relay Architectures for E-UTRA (LTE-Advanced), 2010.
- [8] 3GPP TR 36.814, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9), 2010.
- [9] Klaue, Jirka, Berthold Rathke, and Adam Wolisz. "Evalvid - A framework for video transmission and quality evaluation." Computer Performance Evaluation. Modelling Techniques and Tools. Springer Berlin Heidelberg, 2003. 255-272.
- [10] Dahlman, Erik, Stefan Parkvall, and Johan Skold. 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband. Academic Press, 2011.
- [11] Arizona State University, YUV Video Sequences. disponível em <http://trace.eas.asu.edu/yuv/index.html>
- [12] Ohm, Jens-Rainer. "Bildsignalverarbeitung fuer multimedia-systeme." Skript, Institut für Nachrichtentechnik und theoretische Elektrotechnik der TU Berlin (1999).