

# Uso de ambiente de testes emulado para pré-avaliação de desempenho de redes LTE reais

Sérgio Sakai, Gilberto Gamburgge, Ricardo Takaki, Jorge Seki, Juliano Bazzo, e João Paulo Miranda

**Resumo**—Não obstante a contribuição do padrão *Long Term Evolution* (LTE) no sentido de prover uma melhor experiência do usuário em redes de próxima geração, a sua alta complexidade é conhecida por demandar uma elevada carga computacional e um elevado tempo de processamento em testes que envolvam plataformas reais. Atualmente, a ferramenta mais utilizada para lidar com esta questão é a simulação. LENA, por exemplo, é um simulador de código aberto baseado na plataforma ns-3 que permite o projeto, a avaliação e a validação de redes LTE. Apesar de modelar os principais elementos de LTE e suas interfaces, uma limitação do LENA é que ele *não* suporta o uso de entidades geradoras de tráfego externas operando em conjunto com a simulação. Neste artigo, descrevemos como o framework LTE do ns-3/LENA pode ser customizado para uso em um ambiente de teste baseado em emulação que permite a execução de uma ampla variedade de aplicações do mundo real nos enlaces simulados. Para validar nossos resultados de emulação, usamos como referência um ambiente de teste que difere do mencionado pela substituição do servidor aonde roda a simulação de rede por uma rede composta de elementos reais. Resultados iniciais de validação, com base em testes limitados usando uma ferramenta comercial padrão de teste VoIP (IxCharriot) e uma ferramenta para medição de vazão (iperf), demonstram que os modelos LTE do LENA são capazes de proporcionar qualidade de voz e latência tão boas quanto aquelas do ambiente LTE real sobre uma ampla faixa de relações sinal-ruído. Conclusões semelhantes são também verificadas para a vazão, confirmando assim a adequação da nossa abordagem de emulação como meio viável para prever o desempenho de redes LTE reais. A boa concordância de nossos resultados experimentais é possível não apenas porque a *mesma* funcionalidade é implementada em ambos os experimentos, mas também devido à utilização das *mesmas* ferramentas de geração de tráfego no ambiente simulado e no ambiente real de rede LTE – algo que não é possível na simulação LENA padrão.

**Palavras-Chave**—3GPP, LTE, LENA, ns-3, plataformas reais, testbeds

## I. INTRODUÇÃO

Desde o release 8 do padrão Long Term Evolution (LTE) [1], o Third Generation Partnership Project (3GPP) tem especificado funcionalidades de grande importância para o desenvolvimento de redes de próxima geração. A adoção de orthogonal frequency division multiple access no downlink, single-carrier frequency division multiple access no uplink, tecnologias de múltiplas antenas e reduzido intervalo de transmissão tornam possível para as redes LTE o provimento de transmissões de dados com altas taxas e baixa latência. Não obstante o valor agregado das capacidades acima mencionadas para uma melhor experiência de usuário, a alta complexidade do LTE impõe altas cargas de processamento computacional em tarefas de teste envolvendo plataformas reais. A simulação

é a ferramenta mais utilizada para lidar com esse desafio, apesar de que o uso de implementação e emulação em pesquisa tem crescido como alternativas à simulação pura. Implementação significa que o experimento roda em uma pilha de protocolos integralmente implementada em uma plataforma real, enquanto que emulação é um termo usado para denotar experimentos que resultam de uma combinação entre simulação e implementação [2].

No contexto do LTE, a maioria dos simuladores encontrados na literatura tendem a contar com processos geradores de tráfego próprios (*e.g.* [3] e [4]). Este é o caso do LENA [5], um módulo recentemente introduzido na plataforma ns-3, cujo uso tem crescido na comunidade face às funcionalidades, protocolos e interfaces LTE nele implementadas. Uma limitação do LENA é que ele *não* suporta o uso de entidades geradoras externas de tráfego em conjunto com a simulação LTE. Neste artigo, descrevemos como o framework ns-3 LENA LTE pode ser customizado para uso em um ambiente de teste baseado em emulação que permite que uma ampla variedade de aplicações reais sejam executadas em enlaces simulados. As interfaces internas criadas dentro da versão customizada do LENA podem ser subsequentemente associadas a interfaces Ethernet *externas* ao servidor ns-3 executando a simulação. Isto permite a conexão física do servidor ns-3 com outras máquinas rodando ferramentas de teste padrão comerciais ou livres, *e.g.* IxCharriot [6] e iperf [7]. A partir daí (e de outras modificações necessárias para trafegar dados reais dentro das entidades LTE simuladas), avaliamos o desempenho do emulador em termos de qualidade de voz, latência e vazão.

Para validar os resultados obtidos via emulação, usamos como referência um ambiente de testes que difere do emulado pela substituição da rede LTE simulada por plataformas LTE reais. Resultados iniciais de validação, baseados em medidas de Voz sobre IP (VoIP) e vazão usando IxCharriot e iperf, respectivamente, demonstram que os modelos ns-3 LTE são capazes de prover qualidade de voz e latência tão boas quanto as do ambiente de testes baseado em equipamentos LTE reais sobre uma ampla faixa de relações sinal-ruído (SNR). Conclusões semelhantes são também verificadas para a vazão, confirmando assim a adequação da nossa abordagem de emulação como um meio viável para se estimar o desempenho de redes LTE reais.

A boa concordância dos nossos resultados é possível não só porque a mesma funcionalidade é implementada em ambos os experimentos, mas também devido à utilização das mesmas ferramentas de geração de tráfego no ambiente emulado e no ambiente real. Até o momento da escrita deste trabalho, e até onde pudemos constatar, a literatura ainda carece de

S. Sakai, G. Gamburgge, R. Takaki, J. Seki, J. Bazzo, e J. P. Miranda, CPqD – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações, Campinas/SP, Brasil, E-mails: [sakai, gneto, rtakaki, jseki, jbazzo, jmiranda]@cpqd.com.br

contribuições combinando simuladores sistêmicos e ferramentas reais visando testar a tecnologia LTE. O restante deste paper está organizado como segue. A Seção 2 descreve a arquitetura geral de medição comum a ambos os experimentos, o ambiente emulado (Experimento I) e o ambiente real (Experimento II) usado como referência. A metodologia de medição adotada é apresentada na Seção 3, juntamente com métricas de desempenho e resultados experimentais. A Seção 4 encerra o artigo com considerações finais.

## II. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Esta seção descreve os experimentos propostos neste documento com o auxílio da Figura 1. São discutidas também as customizações realizadas no LENA e as opções de projeto escolhidas.

### A. Arquitetura Geral

A Figura 1(a) mostra a arquitetura geral utilizada em ambos os experimentos. Esta consiste de um servidor, uma rede LTE genérica e dois pontos de extremidade do cliente (*endpoints*). O servidor IxChariot [6] é utilizado para controlar e medir o tráfego que flui através da rede LTE. Esta ferramenta se comunica diretamente com o endpoint encontrado no *Packet Data Gateway Network* (PGW) e indiretamente, via rede LTE, com o *endpoint* encontrado no terminal (*user equipment* – UE). Os *endpoints* PGW e UE são conectados às interfaces do host PGW (eth0) e do UE (eth1) da rede LTE, respectivamente. Esta arquitetura geral pode ser configurada de modo a permitir duas avaliações de desempenho diferentes.

A primeira configuração, vista na Figura 1(a), avalia qualidade de voz e latência sendo que os endpoints do IxChariot são responsáveis por gerar tráfego VoIP. A segunda configuração avalia o rendimento alcançado nos experimentos. Neste caso, a ferramenta IxChariot é removida e tráfego utilizando o protocolo *User Datagram Protocol* (UDP) é gerado diretamente entre os *endpoints*. O foco agora é na taxa de transferência, não na latência, de modo que estatísticas detalhadas de latência não são coletadas nesta segunda configuração (embora inspecionadas por amostragem para garantir que os atrasos ponto a ponto através dos sistemas são comparáveis). A ferramenta iperf [7] é utilizada para este fim, com os *endpoints* do UE e PGW configurados como servidor e cliente, respectivamente.

Nos referimos à rede genérica LTE como “experimento-dependente” devido ao fato dela poder assumir a forma de um emulador baseado em ns-3/LENA ou um *testbed* prático formado por plataformas reais dependendo do experimento considerado. Nosso simulador LTE baseia-se em cenários ns-3/LENA padronizados, porém contendo customizações simples. Uma breve descrição da rede LTE simulada é mostrada neste trabalho, sendo que o leitor interessado nos detalhes pode recorrer a [8] para a arquitetura do simulador ns-3/LENA e [9] para a sua documentação específica. Ambos os experimentos consideram a recentemente padronizada Banda 31 (450-470 MHz), com duplexação por divisão de frequência, canal de operação de 5 MHz, modulação adaptativa e escalonador round robin em conformidade com [10]. Este setup permite uma comparação justa entre nossos experimentos pois, apesar de

um ser uma implementação simulada e o outro ser um sistema real, a mesma funcionalidade é implementada em ambos os experimentos e também são utilizadas as mesmas ferramentas de geração de tráfego. A seguir são descritos os experimentos e as suas implementações da rede LTE.

### B. Experimento I: Rede LTE Simulada

O primeiro experimento reúne um ambiente de teste baseado em emulação utilizado para prever o comportamento e o desempenho de redes LTE reais. Para tanto, substituímos a rede LTE genérica (Figura 1(a)) por uma rede LTE simulada que consiste em um servidor ns-3 executando blocos LENA (Figura 1(b)). O servidor ns-3 é equipado com um PC com processador Intel Core i7-2600 quadcore de 3.4 GHz, 8 GB de memória de acesso aleatório, e duas interfaces Ethernet físicas executando Linux Ubuntu 12.04 como sistema operacional.

Além da interface aérea, UE possui uma interface Ethernet (eth1) simulada que é mapeada para a interface física de rede do servidor ns-3. Isto torna possível conectar UE com interface Ethernet (eth0) de um PC externo que por sua vez executa o endpoint do IxChariot. Nesta configuração, UE funciona como modem LTE; com o PC externo desempenhando o papel de cliente deste modem LTE simulado. Similarmente, uma das interfaces Ethernet (eth0) pertencente a um computador central na rede simulada LTE EPC é mapeada em uma interface de rede física do servidor ns-3. Tal host PGW é responsável por encaminhar o tráfego da rede LTE simulada para o PC externo executar o *endpoint* do IxChariot.

As interfaces físicas de rede do servidor ns-3 estão conectadas às interfaces correspondentes eth0 e eth1 da Figura 1(a). O simulador ns-3 suporta tal associação entre entidades externas de tráfego e nós internos que são parte da simulação. Este tipo de suporte, fornecido pela classe *FdNetDevice*, pode ser explorado para permitir a troca de dados entre fontes de tráfego reais externas (não simuladas) e os nós simulados. Nota-se que cenários típicos LENA *não* suportam a utilização de tráfego de dados externos em conjunto com nós de rede LTE simulada.

Para contornar essa limitação, customizações são implementadas a nível de dados, roteamento entre os elementos de rede, interfaces de rede do UE e também no host conectado ao servidor PGW. Primeiramente, é criado um caso de uso ns-3/LENA com duas interfaces: uma associada ao UE; outra ao PGW. A classe *FdNetDevice* do ns-3 é usada para criar as interfaces internas, permitindo a associação destas com as interfaces Ethernet externas do servidor ns-3. A seguir, são conectadas as interfaces de rede de PGW (eth0) e UE (eth1) do servidor ns-3 a dois laptops diferentes, respectivamente configurados como endpoints PGW e UE.

O cálculo da SNR considera os parâmetros de simulação que correspondem ao nível de ruído e a figura de ruído de *front-end* de rádio frequência (RF) do UE. Alterações na SNR recebida são regidas pela perda de percurso baseada no modelo de distância, através da alteração dos parâmetros do simulador relacionados à distância de linha de visada entre a eNodeB e UE. Todas as simulações são realizadas em tempo real, com as configurações de interface aérea da rede LTE configuradas para operação na Banda 31 conforme descrito na Seção II-A.

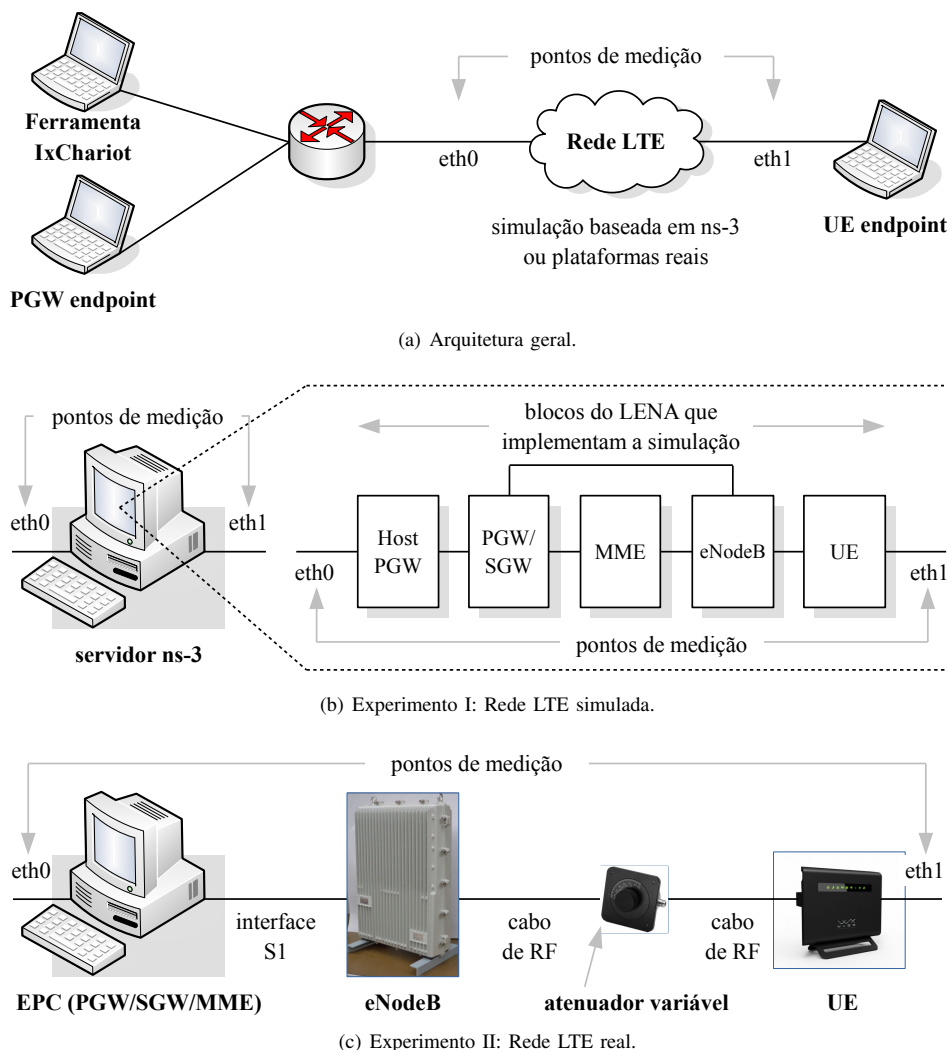


Fig. 1. Descrição dos experimentos considerados neste artigo. A arquitetura de medição descrita em (a) é comum a ambos os experimentos. O Experimento I substitui a rede LTE com um servidor ns-3 executando blocos LENA como em (b). O Experimento II considera as plataformas LTE reais em (c).

O Experimento I torna possível avaliar o desempenho da simulação LENA com base em ferramentas de análise de dados de tráfego comumente utilizadas nas avaliações de pré-implantação e implantação de redes LTE do mundo real. Tal ambiente de teste baseado na emulação, pode ser usado como ferramenta de previsão desde que o comportamento e o desempenho do mundo real e simulado de redes combinem bem. Isso coloca em prática a motivação para outro experimento descrito na sequência.

### C. Experimento II: Rede LTE Real

Para validar o Experimento I, consideramos um experimento de referência onde a rede LTE genérica é substituída por um cenário de teste prático formado por dispositivos reais, *i.e.* EPC, eNodeB e UE reais, conforme ilustrado na Figura 1(c). As interfaces físicas de rede de UE (eth1) e PC desktop (eth0) executando o software da EPC estão conectados às interfaces correspondentes da Figura 1(a). A interface padrão S1 conecta EPC e eNodeB. eNodeB e UE comunicam-se através de cabos de RF visando assegurar a ausência de fontes de interferência

externas não controladas – como é frequentemente o caso em setups sem fio [11]. Conseqüentemente, e como no Experimento I, UE é um modem LTE real conectado com o servidor EPC real, sendo este último responsável pelo encaminhamento do tráfego de dados através da rede. O tráfego é medido de modo ponto a ponto (depois de trafegar através de toda a rede LTE, seja simulada ou real, incluindo a interface RF e também a EPC), *não* havendo então discrepâncias entre os experimentos mostrados na Figura 1.

## III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Esta seção é dedicada aos resultados obtidos em nossos experimentos. Porém, antes de apresentá-los, é conveniente descrever a metodologia adotada nos experimentos e as métricas utilizadas para caracterizar o desempenho de cada experimento realizado.

### A. Metodologia de Medição

Os resultados apresentados nesta seção são derivados com base na metodologia descrita a seguir. Diferentes tipos de

TABELA I  
MEAN OPINION SCORE

MOS	Qualidade	Prejuízo
5	Excelente	Imperceptível
4	Bom	Perceptível porém não gera incômodo
3	Razoável	Leve incômodo
2	Pobre	Incômodo
1	Ruim	Grande incômodo

tráfego de dados são considerados, com cada um deles testado isoladamente. São feitas três medidas para cada tipo de tráfego a um certo valor de SNR e gerada uma média destas medidas. Cada medição tem duração de um minuto. O comando “top” do Linux é utilizado para monitorar utilização de CPU, estatísticas dos processos, e utilização de memória, de modo a garantir que o servidor ns-3 executando a emulação está suportando a carga de trabalho durante as medidas.

O primeiro tipo de tráfego são chamadas VoIP de 64 kbps geradas pelo IxCharriot. Todas as medições são realizadas ao longo de diferentes pares de conversação usando o *Real Time Protocol* (RTP). Cada par de conversação está configurado para transmitir uma, cinco ou dez chamadas VoIP simultâneas, codificadas usando o codec G.711 [12]. Em ambos os experimentos, as métricas de desempenho consideradas relevantes para o caso do tráfego VoIP são o *Mean Opinion Score* (MOS) e a latência. MOS é um método para a determinação subjetiva da qualidade de voz, classificado numa escala de um a cinco, como resumido na Tabela I [13].

O segundo tipo de tráfego, gerado por meio do aplicativo iperf, é UDP. Neste caso, a taxa de dados é configurada para 20 Mbps de modo a ocupar todos os blocos de recursos físicos (em tentativa de exaurir as capacidades de funcionamento da interface aérea LTE na Banda 31). Em ambos os experimentos, a métrica de desempenho avaliada para o caso do tráfego UDP é a vazão.

### B. Avaliação da Qualidade de Voz e Latência

A Figura 2 mostra a qualidade de voz medida durante os experimentos em termos de MOS sobre uma variação nos valores de SNR. De acordo com a Tabela I, o MOS observado para ambos os experimentos se traduz em qualidades vocais percebidas que variam entre “bom” e “excelente” – mesmo em SNR de apenas 5 dB, e independentemente ao número de chamadas simultâneas. A discrepância no MOS de 0.01 entre o Experimento I (Rede LTE Simulada) e Experimento II (Rede LTE Real) é insignificante, visto que não há diferença perceptível entre as qualidades de voz observadas.

A Figura 3 mostra a latência média dos pacotes de voz (dados RTP) medidos durante os experimentos. Pode-se observar que a latência média não foi superior a 20 ms. Considerando-se as recomendações de [14], esta condição significa que todos os usuários estão “muito satisfeitos” independente de se estar utilizando a rede LTE simulada ou a rede LTE real. É interessante salientar que, apesar da variância associada às medições, a latência observada para a rede LTE real mostra uma tendência de crescimento com o número de chamadas simultâneas enquanto que a latência da rede LTE simulada permanece sempre maior que a da rede LTE real e aproximada-

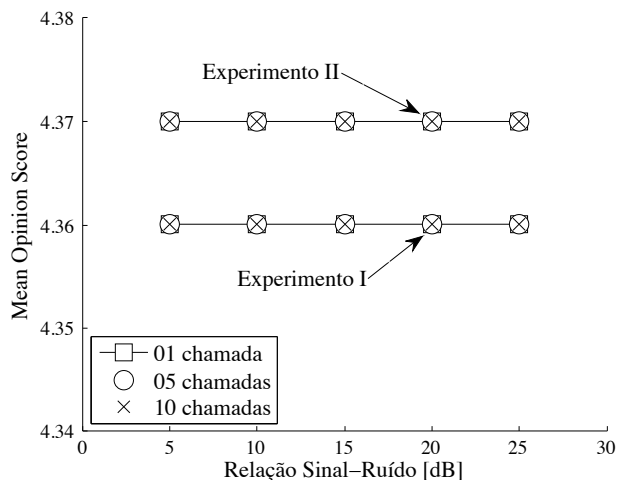


Fig. 2. MOS sob tráfego VoIP. A qualidade de voz percebida é acima de “bom” (MOS = 4.00) e abaixo de “excelente” (MOS = 5.00) em ambos os experimentos. A discrepância de 0.01 em o MOS entre Experimento I (Rede LTE Simulada) e Experimento II (Rede LTE Real) é insignificante.

mente constante independentemente da SNR e do número de chamadas. Acreditamos que esta latência maior da rede LTE simulada seja provavelmente causada pelo atraso inerente para processar o fluxo de pacotes em tempo real dentro do ambiente de simulação ns-3/LENA.

### C. Avaliação da Vazão

A Figura 4 mostra a vazão medida durante nossos experimentos para diferentes valores de SNR. O comportamento observado em ambos os experimentos é intuitivo a respeito da variação no desempenho da vazão em função da variação da SNR. Graças às simplificações inerentes à rede LTE simulada (em comparação com a rede LTE real), pode ser observada na figura uma ligeira vantagem do Experimento I sobre o Experimento II.

## IV. OBSERVAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou um ambiente de testes emulado baseado em versão customizada do framework ns-3/LENA LTE, que teve seu tratamento de tráfego de dados alterado para permitir que uma ampla variedade de aplicações do mundo real rodem sobre enlaces simulados. Para validar os resultados obtidos via emulação, usamos como referência um ambiente de testes que difere do ambiente emulado pela substituição do servidor ns-3 executando a simulação de rede LTE por uma rede construída usando plataformas LTE reais. Resultados iniciais de validação, baseados em testes limitados usando as ferramentas IxCharriot e iperf, demonstram que os modelos LTE do ns-3/LENA são capazes de prover qualidade voz (em termos de MOS) e latência tão boas quanto aquelas obtidas com equipamentos LTE reais em uma ampla faixa de SNRs. Conclusões similares foram verificadas para a vazão, confirmando a viabilidade de nossa abordagem de emulação como meio viável de prever o desempenho de redes LTE reais.

No caso específico da latência, a performance do ambiente de testes real demonstrou-se ligeiramente melhor do que o

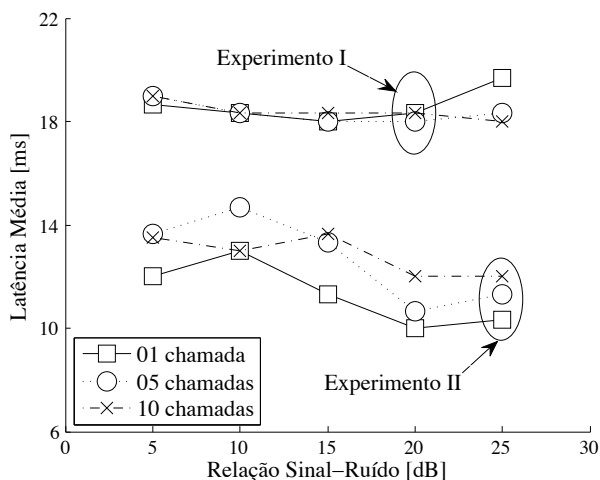


Fig. 3. Latência média sob tráfego VoIP. Valores de latência menores que 20 ms significam que todos os usuários estão “muito satisfeitos”. O Experimento II (Rede LTE Real) apresenta desempenho superior ao Experimento I (Rede LTE Simulada) devido ao tempo requerido pela emulação para realizar o processamento dos pacotes.

ambiente de testes emulado devido a latência característica do segundo, a qual não sofre variações significativas à medida em que o número de chamadas varia. Quanto à vazão, o desempenho de ambos os experimentos melhora a medida em que a SNR é incrementada. Entretanto, devido a simplificações inerentes à simulação da rede LTE usada no ambiente emulado, este supera levemente o ambiente real ao longo da faixa de SNRs considerada.

A boa concordância dos nossos resultados experimentais é possível não só porque a mesma funcionalidade é implementada em ambos os experimentos (incluindo faixa de frequência de operação, modo de duplexação, largura de canal, modulação e escalonamento) mas também devido à utilização das mesmas

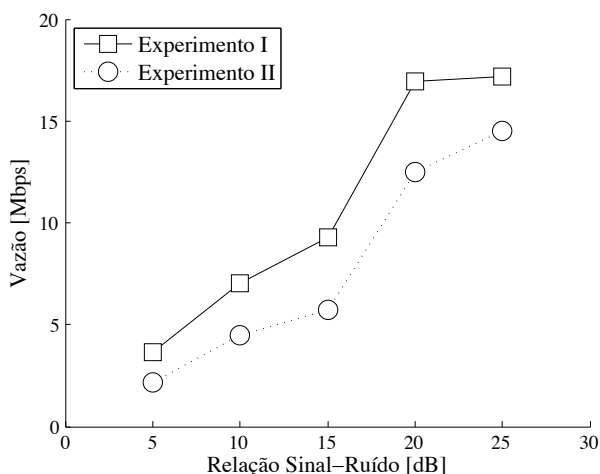


Fig. 4. Vazão sob tráfego UDP. Ambos os experimentos exibem vazão crescente em função da SNR, apesar do Experimento I (Rede LTE Simulada) apresentar desempenho levemente superior ao Experimento II (Rede LTE Real) devido às simplificações inerentes à simulação.

ferramentas de geração de tráfego no ambiente simulado e no ambiente real de rede LTE – algo que não é possível em simulação ns-3/LENA padrão.

Até a escrita deste trabalho, e até onde pudemos constatar, a literatura ainda carece de contribuições combinando simuladores sistêmicos e ferramentas reais visando testar a tecnologia LTE. Sugestões para trabalhos futuros poderiam envolver extensões aos experimentos aqui propostos a outros tipo de tráfego de dados, tais como navegação web, transferência de arquivos e vídeo. Usando tais aplicações interativas, medidas de qualidade de experiência (*quality of experience* – QoE) podem ser tomadas como um passo subsequente natural para os testes descritos no presente artigo. Outra linha de investigação consistiria em considerar múltiplos UEs e verificar a validade das comparações realizadas aqui para o caso de cenários multi-usuários.

#### AGRADECIMENTOS

Este material baseia em parte em trabalhos suportados pelo FUNTTEL/FINEP sob as subvenções 01.12.0481.00 e 01.09.0631.00.

#### REFERÊNCIAS

- [1] 3GPP TR 21.101, “Technical Specifications and Technical Reports for a UTRAN-based 3GPP system”, Dec. 2008.
- [2] A. S. Abdallah, A. B. MacKenzie, L. A. DaSilva, and M. S. Thompson, “On Software Tools and Stack Architectures for Wireless Network Experiments”, *In Proc. of the IEEE WCNC*, pp. 2131-2136, Mar. 2011.
- [3] G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, F. Capozzi, and P. Camarda, “Simulating LTE Cellular Systems: an Open Source Framework”, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 2, pp. 498-513, Nov. 2010.
- [4] K. Andersson, S. A. M. Mostafa, and R. Ui-Islam, “Mobile VoIP User Experience in LTE”, *In the Proc. of the IEEE LCN*, pp. 4-7, Oct. 2011.
- [5] N. Baldo, M. Miozzo, M. Requena, and J. Nin Guerrero, “An Open Source Product-Oriented LTE Network Simulator based on ns-3”, *In Proc. of the ACM MSWiM*, pp. 293-298, Nov. 2011.
- [6] IxChariot User Guide, Release 7.10, 913-0949-04 Rev. A. May 2011. [Online]. Available: <http://www.ixiacom.com/user-guides>
- [7] A. Tirumala, M. Gates, F. Qin, J. Dugan and J. Ferguson, “Iperf - The TCP/UDP bandwidth measurement tool”. [Online]. Available: <http://dast.nlanr.net/Projects/lperf>
- [8] N. Baldo, “The ns-3 LTE module by the LENA project”. [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/tutorials/consortium13/lte-tutorial.pdf>
- [9] LENA v8 documentation, “ns-3 LTE module documentation”. [Online]. Available: <http://lena.cttc.es/manual>
- [10] 3GPP TR 36.840, “LTE 450MHz in Brazil Work Item Technical Report”, Sept. 2013.
- [11] A. F. Cattoni et al., “Designing a Cognitive Radio Test bed - Practical Issues”, *Cognitive Radio and Networking for Heterogeneous Wireless Networks*, Springer, 1st Edition, Jul. 2014.
- [12] ITU-T Recommendation G.711 (11/88), “Pulse Code Modulation (PCM) of Voice Frequencies”, Nov. 1988.
- [13] ITU-T Recommendation P.800 (08/96), “Methods for Subjective Determination of Transmission Quality”, Ago. 1996.
- [14] ITU-T Recommendation G.114 (05/03), “One Way Transmission Time”, May 2003.