

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TÍTULO DO TRABALHO

**Simulação e Avaliação das Tecnologias LTE e DSL
como Backhaul Utilizando Software OPNET**

NOME DO AUTOR

Silvia Cristina Feijó Lins

DM:31/2013

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

NOME DO AUTOR

Silvia Cristina Feijó Lins

TÍTULO DO TRABALHO

**Simulação e Avaliação das Tecnologias LTE e DSL
como Backhaul Utilizando Software OPNET**

DM:31/2013

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

NOME DO AUTOR

Silvia Cristina Feijó Lins

TÍTULO DO TRABALHO

**Simulação e Avaliação das Tecnologias LTE e DSL
como Backhaul Utilizando Software OPNET**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica, ênfase em Telecomunicações.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2013

Agradecimentos

Reconheço e aqui agradeço a dedicação e esforço cooperativo de todos os envolvidos direta ou indiretamente na realização deste trabalho. Esta dissertação é resultado não só da pesquisa e aprendizado dos últimos meses, mas da evolução iniciada com os princípios ensinados a mim pela minha família, sempre ressaltando a importância do conhecimento para o crescimento pessoal, não medindo esforços para que eu pudesse lograr êxito na minha jornada. Pai, mãe, vó (vô), madrinha, espero sempre poder retribuir a todo o apoio que venho tendo ao longo da minha vida.

Sem meus professores esta evolução também não teria sido possível. Desde a graduação pude contar com profissionais que me serviram de motivação para a engenharia e mestra que almejo ser. Me considero uma pessoa de sorte de ter tido professores tão empenhados, capacitados e comprometidos com sua profissão. Serei eternamente grata à vocês.

Agradeço aos amigos, sempre compreensivos e incentivadores, companheiros com os quais dividi bons momentos e inesquecíveis “melhores piores” momentos, que sempre lembramos e sempre lembraremos mesmo quando as previstas e imprevistas mudanças na vida de cada um tentem nos distanciar.

Agradeço também ao LaPS, ambiente no qual chances nunca faltaram para o desenvolvimento intelectual de seus integrantes, ao meu orientador, Prof. Aldebaro, provedor de encorajamento contínuo para todos nós. Aos colegas de trabalho, pela parceria e por tornar o meu trabalho cada vez mais gratificante.

Ao Igor, companheiro, amado, amigo, por me inspirar cada dia mais, desde o momento em que percebi que a única coisa que me faltava na vida era inspiração.

Silvia Cristina Feijó Lins

Resumo

A crescente demanda por capacidade vem levando os padrões de comunicação sem-fio a prover suporte para a coexistência de macro e pico células. O *backhaul*, conexão entre a rede de acesso e o núcleo da rede, é de grande interesse neste contexto devido aos diversos desafios técnicos e financeiros envolvidos ao tentar satisfazer o crescente tráfego dos usuários. Fibra óptica e micro-ondas com linha de visada são as opções mais amplamente adotadas para o backhaul de macro-células. Contudo, em muitas situações de interesse prático, estas não são factíveis devido aos altos custos e logística envolvidos. Este trabalho avalia o backhaul de pico-células, focando primeiramente na utilização de cobre como backhaul. O simulador OPNET foi utilizado para avaliar os requerimentos de backhaul para redes móveis em cenários específicos considerando garantir qualidade de serviço para os diversos tipos de tráfego envolvidos. Assumindo demandas de tráfego para LTE e LTE-Advanced, as tecnologias VDSL2 e G.fast são avaliadas e os resultados mostram que mesmo com uma grande demanda de aplicações de vídeo de alta definição, estas tecnologias podem acomodar o tráfego no backhaul de pico-células. VDSL2 é capaz de prover as taxas requeridas para cenários de pico-células LTE, mas não é capaz de acomodar tráfego LTE-Advanced típico. Por outro lado, considerando as taxas atingidas com a tecnologia G.fast, o tráfego backhaul para pico-células LTE-Advanced pode ainda ser entregue com garantias de qualidade de serviço. Neste trabalho também é proposta uma solução para simulação de cenários contendo redes de acesso heterogêneas considerando backhaul LTE sem linha de visada. São demonstrados também os resultados de simulações no OPNET com o backhaul LTE proposto para validar a solução proposta como capaz de caracterizar o tráfego de ambas as tecnologias WiFi e LTE na rede de acesso de acordo com o tipo de serviço.

Abstract

The increasing demand for capacity has been driving the wireless communication standards to provide support to the coexistence of macro and small cells. The backhaul, which is the link between the radio access network and the backbone, is of particular interest due to the many involved technical challenges on keeping up with the user demand for bandwidth. Line-of-sight microwave radio and optical fiber are the preferred choices and widely adopted for the mobile backhaul (MBH) of macrocells. However, in many situations of practical interest, both options are not feasible due to cost and logistics. This work evaluates the backhaul of small cells, focusing on the adoption of copper pairs. Opnet was also used to evaluate copper MBH requirements in specific scenarios taking into consideration QoS provisioning. Assuming traffic demands for LTE and LTE-Advanced, VDSL2 and G.fast technologies are evaluated and the results show that even with a heavy load of video, these technologies can accommodate the small cell MBH traffic. VDSL2 is capable of delivering the required data rates for LTE small cell scenarios but not if considered LTE-Advanced traffic. Otherwise, if considered G.fast data rates, backhaul traffic for LTE-Advanced small cells can still be delivered by xDSL technology with QoS guaranteed. Also, this work enables the implementation of heterogeneous access networks scenarios considering LTE NLOS out-of-band backhaul. A solution of LTE backhaul implementation in OPNET is proposed and simulations are performed to validate such solution as a QoS-aware LTE Backhaul for WiFi and LTE radio access technologies.

Sumário

Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de Abreviaturas	vi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Evolução das redes de telefonia móvel	1
1.2 Backhaul para Redes de Telefonia Móvel	3
1.3 Métodos para planejamento e estimativa de capacidade	4
1.4 Motivação e Objetivos	5
1.5 Contribuição do trabalho	6
1.6 Organização do trabalho	6
2 MODELAGEM DE TRÁFEGO DE BACKHAUL PARA REDES MÓ- VEIS	8
2.1 Modelagem de Tráfego de Pico-Células	9
2.2 Perfis e Aplicações	10
3 USO DE LTE E DSL COMO BACKHAUL	12
3.1 Demandas para <i>backhaul</i> de redes móveis	14
3.2 Backhaul DSL: Motivação e Características	15
3.3 <i>Backhaul</i> LTE: Motivação e Características	16
4 SIMULAÇÕES UTILIZANDO OPNET MODELER	19
4.1 Cenários Implementados	20
4.1.1 Cenário A: Backhaul DSL	20

4.1.1.1	Simulação A.1	23
4.1.1.2	Simulação A.2	24
4.1.1.3	Simulação A.3	24
4.1.2	Cenário B: Backhaul LTE	24
4.1.2.1	Simulação B.1	27
5	RESULTADOS	30
5.1	Resultados para Backhaul DSL	30
5.2	Resultados para Backhaul LTE	35
6	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
6.1	Trabalhos Futuros	40
	Bibliografia	43

Lista de Figuras

1.1	Evolução das gerações de telefonia celular.	2
1.2	Crescimento no tráfego x Crescimento nos lucros. Extraído/traduzido de: [1]	4
3.1	Previsão para pico-células de acesso público até 2015. Fonte: [2]	13
3.2	Porcentagem do custo referente ao <i>backhaul</i> de pico-células comparado com macro-células. Fonte: [2]	13
3.3	Previsão de conexões de <i>backhaul</i> de macro-células, categorizadas de acordo com a tecnologia. Fonte: [3]	14
3.4	Pico RBSs localizadas dentro e fora de edifício comercial, aproveitando a estrutura interna de par-trançado como <i>backhaul</i> .	15
3.5	Cenário contendo <i>Relay Node</i> . A macro eNodeB para a qual este repassa o sinal recebido dos usuários é denominada <i>Donor eNodeB</i> (DeNB). Retirado de [4]	16
3.6	Representação de uma Pico RBS externa localizada em um cenário urbano, sendo conectada ao núcleo da rede através de um <i>backhaul</i> LTE NLOS (<i>Non-Line-Of-Sight</i> , sem linha de visada).	17
4.1	Taxa <i>versus</i> distância para diferentes tecnologias xDSL.	21
4.2	Cenário composto por micro-célula com <i>backhaul</i> DSL implementado no simulador OPNET.	22
4.3	Implementação do cenário contendo <i>backhaul</i> LTE para redes de acesso LTE e WiFi no OPNET.	25
4.4	Implementação do cenário contendo <i>backhaul</i> LTE para redes de acesso LTE e WiFi no OPNET.	27
4.5	Painel de configuração de EPS <i>bearers</i>	28

5.1	Vazão no <i>backhaul</i> para as Simulações A.1, A.2 e A.3. Todos os usuários estão ativos após 150 segundos do início da simulação.	31
5.2	Atraso por aplicação para Simulação A.1 com uma utilização de 50% do <i>backhaul</i>	32
5.3	Simulação A.3: atrasos de cada aplicação para diferentes utilizações do <i>backhaul</i> em 40%, 55% e 60%.	33
5.4	Atrasos de aplicação com diferentes utilizações do backhaul VDSL2.	34
5.5	Backhaul VDSL2 com utilização de 70%, com taxa de 60 Mbps de <i>uplink</i> e 90 Mbps de <i>downlink</i>	35
5.6	Atrasos de aplicação obtidos com enlace de backhaul VDSL2 e G.fast.	36
5.7	Tráfego sendo enviado e recebido pelo usuário LTE, com aplicação FTP (direita) e pelo usuário WiFi, com aplicação VoIP (esquerda).	37
5.8	Resultados de atraso fim a fim obtidos com simulação sem o uso de EPS bearers para tráfego de VoIP (abaixo) e com o uso de EPS bearers (acima).	37

Lista de Tabelas

2.1	Descrição dos perfis de usuários implementados.	10
2.2	Descrição das Aplicações.	11
4.1	Características padronizadas de QCI.	20
4.2	Características da pico-célula LTE, retiradas de [5].	23
4.3	Parâmetros de configuração presentes no módulo <i>UE_eNodeB_Router</i> . . .	28

Lista de Abreviaturas

3GPP *3rd Generation Partnership Project*

ADSL *Asymmetric Digital Subscriber Line*

ARP *Allocation and Retention Priority*

BER *Bit Error Rate*

BHeNB *Backhaul eNodeB*

CSPs *Communication Service Providers*

DeNB *Donor eNodeB*

DL *Downlink*

DSL *Digital Subscriber Line*

DSLAM *Digital Subscriber Line Access Multiplexer*

eNodeB *Evolved Node B*

EPC *Evolved Packet Core*

EPS *Evolved Packet System*

EMM *EPS Mobility Management*

GBR *Guaranteed Bit Rate*

GSM *Global System for Mobile communications*

HDTV *High Definition Television*

HEVC *High Efficiency Video Coding*

HPLMN *Home Public Land Mobile Network*

ITU *International Telecommunication Union*

IMSI *International mobile Subscriber Identity*

MBH *Mobile Backhaul*

MCC *Mobile Country Code*

MNC *Mobile Network Code*

OC *Optical Carrier*

PLMN *Public Land Mobile Network*

PPP *Point-to-Point*

picoRBS *pico Radio Base Station*

PPP *Point-to-Point*

QCI *QoS Class Identifier*

QoS *Quality of Service*

RAN *Radio Access Networks*

RBS *Radio Base Station*

RN *Relay Node*

RTT *Round Trip delay Time*

SDF *Service Data Flow*

SNR *Signal-to-noise ratio*

SONET *Synchronous Optical Networking*

ToS *Type of Service*

UE *User Equipment*

UL *Uplink*

UHD *Ultra High Definition*

VDSL *Very High bit rate Digital Subscriber Line*

WLAN *Wireless Local Area Network*

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Em 2013, pela primeira vez na história, mais de um exabyte de dados é consumido todo mês através das redes móveis globais. Em 2016 são previstos dez exabites por mês [6]. Estes dez bilhões de gigabytes serão majoritariamente oriundos de telefones celulares com acesso à internet móvel de alta velocidade – os *smartphones* – cujas telas de alta resolução, superprocessadores e outras tecnologias de última geração habilitaram uma demanda de tráfego que pode ser tão grande quanto a de computadores pessoais tradicionais. O crescente número de adeptos também vem alavancando o consumo de dados nas redes móveis: No mundo, hoje, 1 a cada 3 celulares é um smartphone e em 2017 eles são previstos como 50% do total [7].

Para chegarem nestes números as redes móveis vem evoluindo desde a década de 80, conforme descrito a seguir.

1.1 EVOLUÇÃO DAS REDES DE TELEFONIA MÓVEL

As redes de telefonia móvel evoluíram de sistemas analógicos de transmissão de voz a sistemas híbridos com tráfego de voz e dados, conforme mostra a Figura 1.1. Os sistemas “1G” surgiram no início da década de 80, sendo sistemas de rádio analógico móvel desenvolvidos em diferentes países sem seguir uma padronização universal.

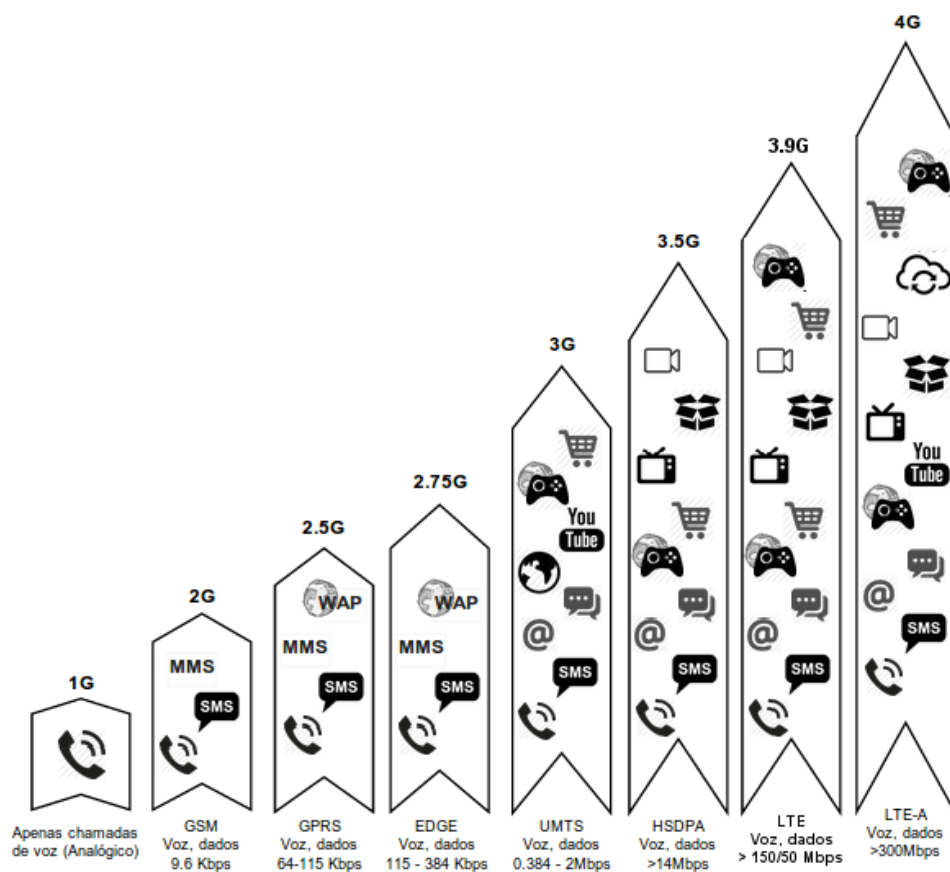


Figura 1.1: Evolução das gerações de telefonia celular.

Com o advento da comunicação digital no entanto, a chance de prover melhor qualidade nas chamadas e maior capacidade para os sistemas alavancou a criação de sistemas “2G”. O projeto GSM (*Global System for Mobile communications*) foi então iniciado em meados de 1980, resultando em um sistema capaz de transmitir voz e dados ainda que em taxas modestas. No início dos anos 90 foi iniciada a pesquisa para desenvolvimento de sistemas de terceira geração (3G), que possibilitaram um salto considerável nas taxas de transmissão em relação aos sistemas anteriores.

A divisão entre sistemas 3G e 4G ainda é turva, sendo o LTE considerado um sistema “3.9G” e o LTE-Advanced um sistema “4G” [8]. Ambos são compostos pela mesma tecnologia, tendo o LTE-Advanced em relação ao seu predecessor LTE uma largura de banda maior agregando diversas portadoras e taxas de transmissão maiores devido

também às técnicas avançadas de multiplexação de antenas.

A evolução da tecnologia de acesso impacta na arquitetura da rede como um todo. Visando minimizar gargalos na rede, reavaliar e aprimorar as demais porções da rede são tarefas cruciais. Considerando que atualmente a maioria das redes tem seus núcleos compostos por enlaces de fibra óptica de alta velocidade, o gargalo muitas vezes fica por conta dos enlaces mais próximos da rede de acesso, muitas vezes compostos por infraestrutura herdada, projetada para redes de capacidade inferior. O *Backhaul* – o enlace responsável por conectar a rede de acesso ao núcleo da rede, vem sendo apontado [9] como o principal gargalo para satisfazer a crescente demanda por taxa de transmissão.

1.2 BACKHAUL PARA REDES DE TELEFONIA MÓVEL

Com a constatação de que o *backhaul* seria o principal gargalo para atender as taxas solicitadas pelas redes de acesso móvel, o interesse pela previsão, planejamento e diferentes formas de implementação desse enlace visando aumentar os custos cresceu consideravelmente nos últimos anos, incentivado também pelo cenário descrito na Figura 1.2: com a mudança na característica do tráfego e a necessidade de maiores investimentos na rede como um todo, a previsão é a de que o crescimento dos lucros não acompanharia o crescimento de tráfego de dados.

Este crescimento nos custos de infraestrutura para redes móveis pode ser explicado tanto pelo crescimento exponencial da demanda de tráfego quanto pela característica “heterogênea” que estas redes adquiriram nos últimos anos. Atualmente é fácil perceber a crescente ocorrência de pontos de acesso para usuários concentrados em áreas como escritórios, *shopping centers*, estações de ônibus/metrô, etc. Contudo não é fácil prover vazão para a quantidade cada vez maior de tráfego oriundo destas células. A dificuldade deve-se à sua característica “fragmentada”, onde várias pequenas células precisam ser conectadas ao núcleo da rede através de enlaces (*backhaul*) de alta capacidade.

O desafio reside nos métodos para planejamento destes enlaces e de como atender às estimativas de demanda mantendo baixos os custos do próprio planejamento, implementação e manutenção destas redes.

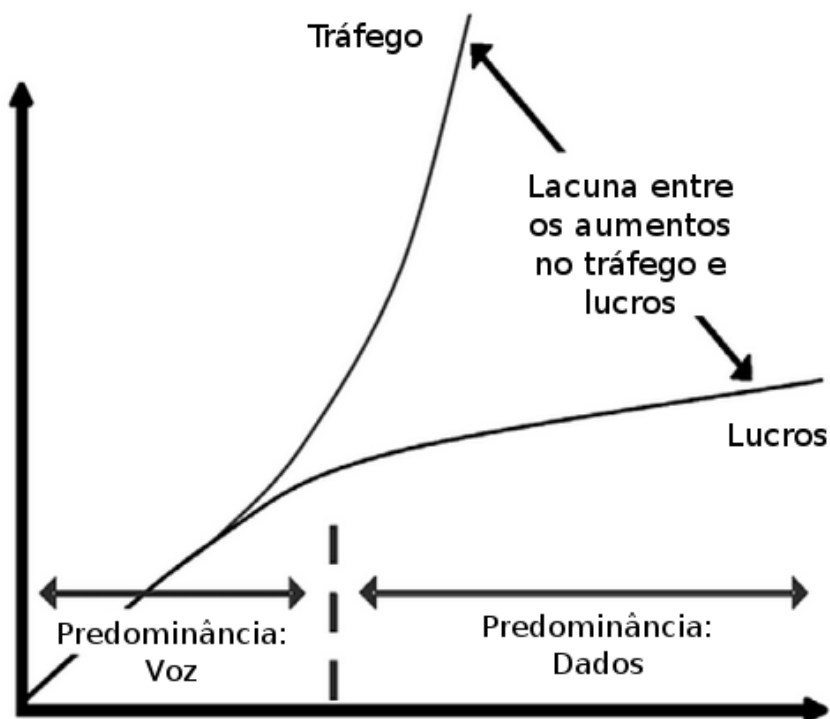


Figura 1.2: Crescimento no tráfego x Crescimento nos lucros. Extraído/traduzido de: [1]

1.3 MÉTODOS PARA PLANEJAMENTO E ESTIMATIVA DE CAPACIDADE

Não existe uma única solução ideal aplicável para estimar a capacidade ou demanda de enlaces e planejar a infra estrutura de redes. Usualmente são mencionados três métodos gerais para avaliação de performance em redes: medições, análise matemática e simulações. Medições necessitam de uma implementação da rede ao passo que simulações ou análise matemática são baseadas em representações ou modelos da rede, sendo preferidas muitas vezes, por serem menos custosas.

O OPNET [10] é o simulador de rede mais amplamente utilizado e referenciado pela indústria e por instituições de grande importância na pesquisa de telecomunicações (BT - *British Telecom*, Cisco, NASA, FBI, Universidade de Harvard e diversas outras

universidades). Tantas instituições dão preferência a este simulador pela variedade e credibilidade de seus modelos e pela profundidade das avaliações que podem ser realizadas com seu uso. Implementações de diversos protocolos e tecnologias, simulações de variados cenários de redes cabeadas e sem fio, modelagem avançada de antenas especificando localização e orientação para avaliar efeitos no sinal devido às características do terreno são alguns dos atributos que fazem deste simulador uma poderosa ferramenta para planejamento de redes e sistemas de telecomunicações.

Grande parte do sucesso do OPNET deve-se ao fato de ele ser um simulador de evento discreto. Atualmente, simulações a eventos discretos (i.e., simulações onde o estado do modelo muda apenas em determinados intervalos no tempo, definidos como *eventos*) são utilizadas em todas as camadas da rede: para processamento de sinais na camada física, protocolos na camada de transporte, etc. Simulações a eventos discretos permitem avaliar redes de computadores de uma maneira flexível, estudando seu comportamento sob diferentes condições [11]. Outro aspecto importante além de custo e flexibilidade é a reprodutibilidade: para o estudo em questão e para muitos estudos em redes, é importante avaliar diferentes soluções diversas vezes exatamente sob os mesmos parâmetros (randômicos) do cenário.

1.4 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

O quadro descrito na Seção 1.2 foi o motivador da pesquisa de soluções eficientes para *backhaul*, principalmente para os casos mais críticos de pontos de acesso com grande demanda de usuários, comumente referidos como *small cells*. Com as redes móveis cada vez mais heterogêneas, i.e. compostas por células de tamanho/número de usuários/capacidade variados, o desafio de planejar o *backhaul* destas células teve sua complexidade aumentada.

O objetivo deste trabalho é auxiliar no planejamento do *backhaul* de redes móveis através de simulações de rede utilizando o software OPNET. Modelando diversos cenários de interesse compostos por redes móveis de alta capacidade - LTE (*Long Term Evolution* - Evolução de Longo Prazo) e LTE-Advanced [12] - e seguindo a orientação dos padrões vigentes e dos órgãos competentes responsáveis por conduzir a pesquisa relacionada à

proxima geração de redes móveis, este trabalho visa estimar a demanda de tráfego sem precedentes que estas redes exigem do *backhaul* e como este pode ser projetado para melhor atendê-las.

1.5 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

A contribuição deste trabalho reside nas soluções propostas para simulação de *backhaul* de cenários específicos de redes LTE e LTE-A utilizando tecnologias DSL (*Digital Subscriber Line* - Linha Digital do Assinante) e a própria tecnologia LTE. As simulações destes cenários permitiram identificar os requisitos de *backhaul* demandados pelas redes de acesso LTE atuais e também auxiliam na previsão de demandas futuras para *backhaul* de redes móveis de quarta geração.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Os capítulos desta dissertação estão organizados da seguinte maneira:

- O Capítulo 1 apresenta a evolução na pesquisa de redes de acesso móvel, as dificuldades encontradas pelas outras porções da rede em acompanhar este desenvolvimento, os métodos utilizados para o planejamento das novas taxas demandadas com a evolução sofrida por estas redes e as contribuições deste trabalho para auxiliar neste planejamento;
- O Capítulo 2 relata a maneira como o tráfego de redes LTE foi modelado nas simulações apresentadas neste trabalho, de acordo com o recomendado pelos órgãos e consórcios reguladores competentes;
- O Capítulo 3 apresenta a justificativa do uso de tecnologias DSL e LTE como *backhaul* em cenários futurísticos de redes móveis heterogêneas e a proposta de cenários para simulação no OPNET Modeler;

- O Capítulo 4 descreve os diferentes cenários e os módulos implementados com o auxílio do simulador OPNET de modo a habilitar as simulações de *backhaul* DSL e LTE pretendidas por este trabalho;
- O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos com as simulações dos cenários-alvo, extraindo os requisitos necessários e as possíveis soluções para *backhaul* de redes de acesso móvel banda larga de nova geração, assim como a validação da solução proposta para simulação de *backhaul* LTE no OPNET;
- O Capítulo 6 apresenta as considerações finais, as contribuições deste trabalho e algumas ideias para trabalhos futuros.

Capítulo 2

MODELAGEM DE TRÁFEGO DE BACKHAUL PARA REDES MÓVEIS

Enquanto as redes celulares tradicionais compostas apenas de macro-células possuem uma arquitetura relativamente simples, as redes do futuro são compostas por diversos elementos distintos, como repetidores intermediários (*relays*), aparelhos capazes de realizar comunicação dispositivo a dispositivo (D2D) ou de compartilharem o acesso a rede sem fio transformando-se em roteadores, etc.

Um panorama de interesse neste trabalho é o das redes heterogêneas [13], compostas por células de variados tamanhos (capacidade e potência) usualmente categorizadas em macro, micro, pico e femto-células cuja necessidade de adoção cresce em paralelo com a complexidade das redes móveis atuais.

Tudo isso torna a predição da demanda e o levantamento de requisitos do *backhaul* de redes móveis uma tarefa complexa e extremamente dependente das suposições e considerações feitas em relação ao tráfego da rede de acesso alvo, e a intenção neste capítulo não é a de apontar a única e verdadeira solução para modelagem das redes em questão, e sim de colecionar e compartilhar as informações disponíveis na literatura para cada

cenário especificamente.

2.1 MODELAGEM DE TRÁFEGO DE PICO-CÉLULAS

Os cenários compreendidos neste trabalho concentram-se na esfera das pico-células: estas surgem como um método para ampliar a capacidade das redes de acesso sem (grandes) impactos nos custos [9] – comparados aos métodos tradicionais de aumento do número de macro-células, que acarretavam além dos altos investimentos em equipamentos e instalação, impasses legais relacionados ao posicionamento das (macro) células. Processos para alocação de grandes antenas usualmente são mais demorados e problemáticos se comparados com aos inconvenientes causados pela implantação de antenas reduzidas para (micro,pico) células.

Para simular cenários contendo pico-células, é necessária a modelagem do tráfego dos usuários (e suas aplicações) atendidos pela estação rádio-base. Pesquisas contendo tarefas de modelagem de tráfego usualmente são balizadas por extensos relatórios técnicos e contribuições dos órgãos competentes (no caso, 3GPP) como em [14], e neste trabalho não foi diferente, contudo contribuições como esta geralmente deixam diversos aspectos de modelagem e funcionamento dos sistemas que descreve como “específicos da implementação“. Em muitos casos isto é considerado vantajoso pois abre mais espaço para pesquisa e desenvolvimento. Por outro lado esta excessiva flexibilidade leva à imprecisão sobretudo se a modelagem de tráfego for só uma parcela da pesquisa e não a pesquisa como um todo, como é o caso deste trabalho.

Com isso, foram levadas em consideração também pesquisas cuja modelagem de tráfego foi descrita de maneira mais precisa. Em [5], o modelo de tráfego recomendado para cenários LTE incluindo pico-células é *full buffer*. Este tipo de modelo de tráfego assume usuários LTE com uma demanda de dados contínua, na máxima taxa que estes são capazes de atingir [15]. Contudo, neste modelo usuários próximos da estação rádio-base, que usualmente possuem bons enlaces para envio e recebimento de tráfego, consomem mais dados do que usuários situados na borda da célula com conexões mais lentas. Favorecer usuários com boas conexões resulta em uma vazão maior para usuários e célula.

2.2 PERFIS E APLICAÇÕES

Modelos de tráfego que assumem que tanto usuários na borda da célula quanto usuários no núcleo consumirão o mesmo volume de dados, como no caso de transferências FTP de arquivos de mesmo tamanho para diferentes usuários, representam melhor o tráfego real esperado para usuários LTE [15], e por isso modelos similares foram adotados neste trabalho [16] com variados tipos de aplicação para caracterizar mais detalhadamente o tipo de tráfego *triple-play*, representado por cinco tipos de usuários diferentes, cada um com um tipo de aplicação, descritos na Tabela 2.1:

Tabela 2.1: Descrição dos perfis de usuários implementados.

Tipo de Perfil	Usuário HTTP	Usuário de Video	Usuário de Voz	Usuário de Jogos	Usuário FTP
Aplicação	HTTP 1.1	vídeo VCR	VoIP com sup. de ruído	Jogo online	FTP
Início do perfil	U(110, 120) s	U(130, 150) s	U(100, 110) s	U(115, 120) s	U(110, 120) s
Duração do perfil	fim da simulação	fim da simulação	fim da simulação	fim da simulação	fim da simulação
Duração da Aplicação	Fim do perfil	Fim do perfil	Fim do perfil	Fim do perfil	Fim do perfil

Estas diferentes distribuições uniformes ($U(110, 120)$, $U(130, 150)$, etc.) foram utilizadas para especificar inícios de transmissão de cada perfil de usuário com pequenas diferenças de tempo, representando de maneira mais fiel um cenário real (onde os usuários não iniciam a transmissão exatamente no mesmo segundo) e evitando uma sobrecarga irreal da rede. A duração de todos os perfis e aplicações foi definida para encerrar apenas com o final da simulação.

As aplicações requisitadas por cada usuário são descritas na Tabela 2.2, e suas implementações foram inspiradas em [16], com exceção da aplicação FTP e vídeo, as quais foram modeladas no OPNET com tamanho e resolução maiores (quadros com resolução 352 x 240 pixels, à taxa de 30 quadros por segundo). Estas foram modeladas considerando suposições mais realísticas para cenários atuais do que nas aplicações de FTP e vídeo descritas em [16].

Tabela 2.2: Descrição das Aplicações.

Application	Assumption
Video	30 fps. Incoming/Outgoing stream frame size: constant(253440) bytes
VoIP	Silence length (sec): $\exp(0.65)$ / Talk Spurt length (sec): $\exp(0.35)$ / Encoder scheme: GSM EFR
Gaming	Packet interarrival time: incoming - $\gamma(1336,5)$ outgoing - $\gamma(1.48,5)$ / Packet Size (bytes): incoming - $\exp(44,40)$ outgoing - $\exp(64,51)$
FTP	Inter request time (sec): $\exp(180)$ / file size: 18 MB
HTTP	Page request interarrival time: 60 s / Objects per page: 5 / Objects size: $U(1,5)$ Kb

Capítulo 3

USO DE LTE E DSL COMO BACKHAUL

Com a crescente variedade de dispositivos capazes de acessar à internet e o interesse dos usuários em dispor de acesso móvel sempre que sentirem necessidade de conectar-se, o cenário das redes de acesso móvel evolui de macro-células geralmente espaçadas de maneira uniforme no meio urbano (e mais dispersas em meio rural) para redes heterogêneas compostas de estações rádio-base com antenas de variadas potências, em células de diferentes tamanhos (macro, micro, pico, femto) [13]. A Figura 3.1, retirada de [2], revela uma expectativa de meio milhão de pico-células de acesso público (isto é, pertencentes às operadoras assim como as macro-células, não incluindo pontos de acesso sem fio configurados por usuários) em todo o mundo em 2015, a maior parcela (aproximadamente 250 mil) encontrando-se na Ásia e a menor parcela (por volta de 30 mil) na América Central/Latina.

Esta tendência ocorre devido as micro/pico/femto-células surgirem como uma estratégia eficiente para satisfazer tanto a crescente demanda por tráfego quanto a necessidade por ubiquidade de acesso móvel. O baixo custo associado à implantação destas micro/pico-células (comparado ao custo associado com a implantação de macro-células) é uma vantagem contrabalançada pelos desafios envolvendo os custos e planejamento de capacidade associados ao *backhaul* [17]. A Figura 3.2 [2] demonstra, pelo próprio baixo

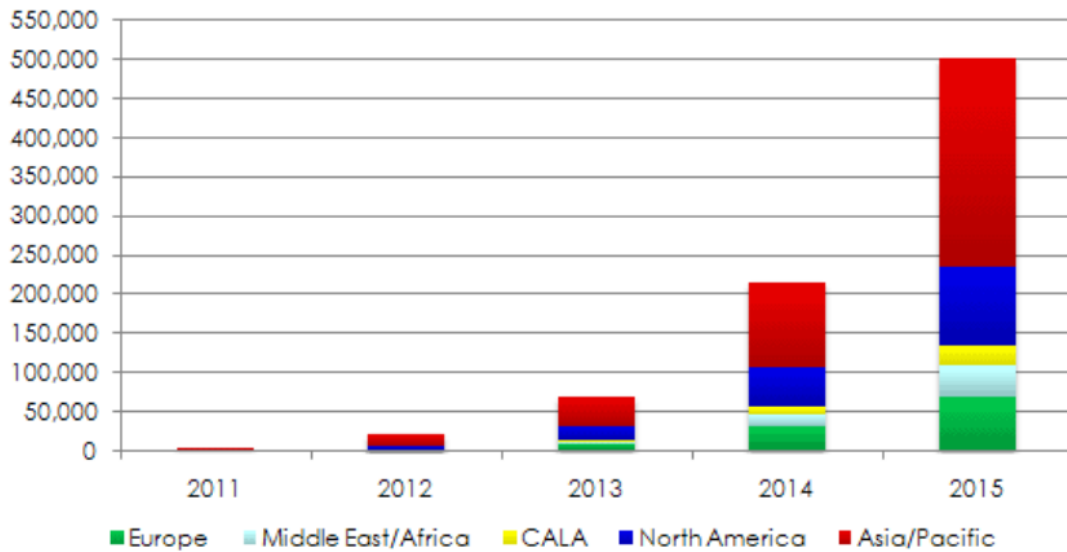


Figura 3.1: Previsão para pico-células de acesso público até 2015. Fonte: [2]

custo envolvido com a implantação da pico-célula, que os custos referentes à adequação do *backhaul* são relativamente maiores se comparados à relação custo do *backhaul* por custo total de macro-células.

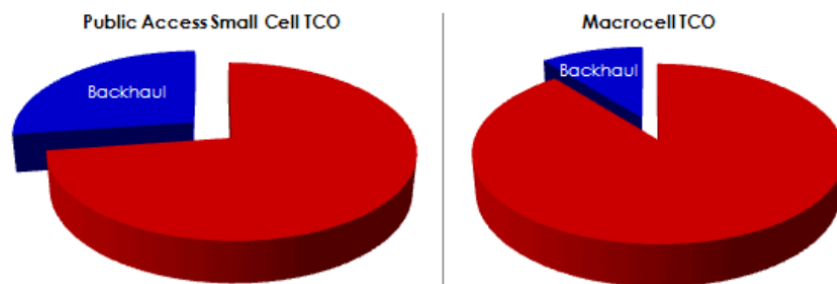


Figura 3.2: Porcentagem do custo referente ao *backhaul* de pico-células comparado com macro-células. Fonte: [2]

Tais desafios fomentaram recentemente estudos e avaliações de soluções eficientes em termos de custo e capacidade para *backhaul* de micro-células [17], [18], [19], [20] e incentivaram este trabalho a avaliar métodos e sugerir soluções para *backhaul* em redes móveis heterogêneas.

3.1 DEMANDAS PARA *BACKHAUL* DE REDES MÓVEIS

Atualmente existem alguns estudos estimando a capacidade do *backhaul* para macro-células LTE. Em [21] foi estimado que a capacidade ideal requerida para MBH (*Mobile Backhaul, Backhaul Móvel*) de macro-células seria de 450 Mbps para *downlink* (DL) e 150 Mbps para *uplink* (UL), considerando macro-células de até 3 setores com 20 Mhz de largura de banda, suportando a taxa de pico de 150/50 Mbps DL/UL cada setor. A avaliação de [21] também sugere que o *backhaul* deve prover um mínimo de 150 Mbps para DL e 50 Mbps para UL e que deve ser garantido um atraso fim-a-fim de no máximo 10 ms. Isto explica o porquê de uma crescente adoção de fibra óptica é prevista para *backhaul* de macro-células nos próximos anos. A Figura 3.3) ilustra o esperado para 2016, quando mais de 90% das conexões de *backhaul* serão compostas por enlaces de fibra óptica ou micro-ondas.

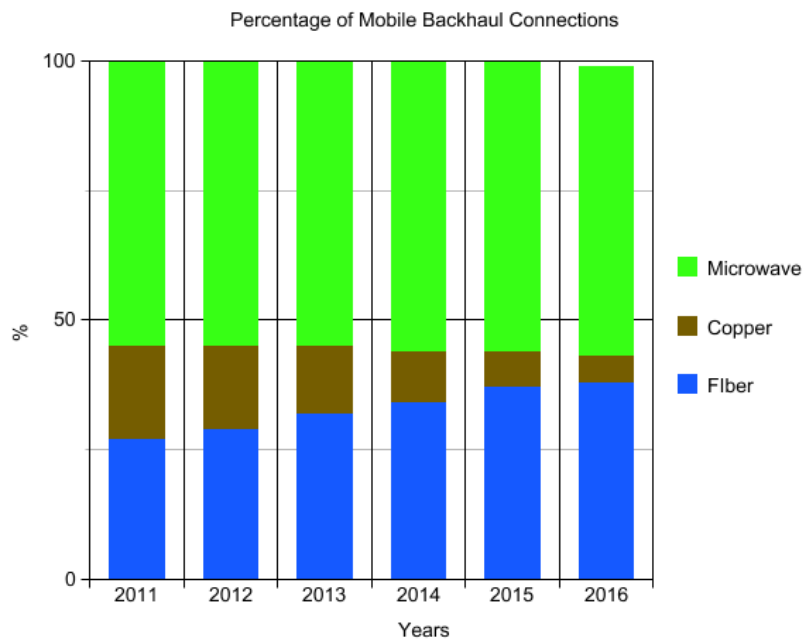


Figura 3.3: Previsão de conexões de *backhaul* de macro-células, categorizadas de acordo com a tecnologia. Fonte: [3]

3.2 BACKHAUL DSL: MOTIVAÇÃO E CARACTERÍSTICAS

Considerando que uma pico-célula é geralmente responsável pela demanda de não mais do que algumas dezenas de usuários, estas requerem soluções de baixo custo para compor seu *backhaul*. Em alguns casos, investimentos em *backhaul* de fibra óptica ou micro-ondas não é visto com bons olhos pelas CSPs (*Communication Service Providers*, operadoras de telefonia) devido seu alto custo, e, apesar de ir de encontro com as previsões para *backhaul* de redes móveis o cobre é uma tecnologia chave para compor o *backhaul* de pico-células devido seu baixo custo. Vale ressaltar que o baixo custo não está associado à implantação de par trançado, e sim ao aproveitamento dos pares muitas vezes já existentes na infraestrutura predial (centros comerciais, estações de trem) onde as pico-células serão instaladas. A Figura 3.4 reflete um dos cenários-alvo deste trabalho: avaliar o cobre (DSL) como *backhaul* de pico-células em casos onde a fibra óptica chega até o edifício (FTTB - *Fiber To The Building*) e em cada sala ou andar é colocada uma pico RBS (*Radio Base Station*, Estação Rádio Base) a qual utiliza como *backhaul* a própria infra-estrutura de cobre preexistente no edifício.

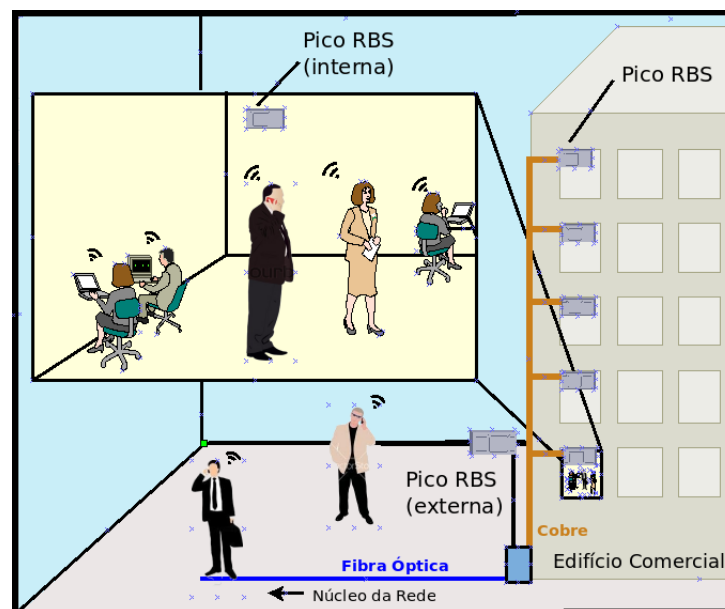


Figura 3.4: Pico RBSs localizadas dentro e fora de edifício comercial, aproveitando a estrutura interna de par-trançado como *backhaul*.

3.3 BACKHAUL LTE: MOTIVAÇÃO E CARACTERÍSTICAS

Quando pico-células são instaladas em locais onde não há disponibilidade de circuitos de cobre, como em diversos casos em centros comerciais ou paradas de ônibus, uma alternativa é *backhaul* micro-onda com ou sem linha de visada (é importante levar em conta que considerando os grandes centros, estabelecer um enlace *backhaul* sem fio com linha de visada para cada picoRBS é uma tarefa praticamente impossível).

Para estes casos, uma solução seria utilizar como *backhaul* a própria tecnologia LTE com (quando disponível) ou sem linha de visada, em outra banda de transmissão para amenizar a interferência com a pico RBS. Contudo, não existe ainda uma estação rádio-base padronizada capaz de se comunicar com ambos – usuários nas redes de acessos e com o *backhaul* LTE – para transmitir a informação da rede de acesso para o núcleo da rede e vice-versa.

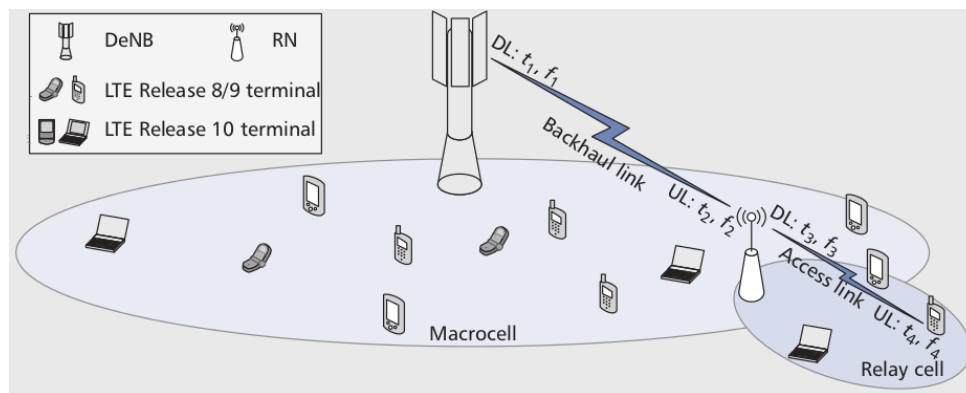


Figura 3.5: Cenário contendo *Relay Node*. A macro eNodeB para a qual este repassa o sinal recebido dos usuários é denominada *Donor eNodeB* (DeNB). Retirado de [4]

Vale ressaltar que recentemente, na versão (*Release*) 10 do LTE, foram padronizados os *relay nodes* (RN) para LTE, dispositivos capazes de estender a cobertura ou de melhorar a qualidade do sinal transmitido por macro eNodeBs (*Evolved Node B*, estações rádio base LTE) na borda da célula (Figura 3.5), que diferem dos repetidores por serem baseados no esquema “decodifica-e-encaminha” (*decode-and-forward*): antes de repassar o sinal recebido dos usuários para a macro eNodeB, os *relays* decodificam e recodificam, aumentando o atraso contudo não amplificando ruído e interferência [4], o que torna *relays*

boas alternativas em ambientes de baixa SNR (*Signal-to-noise ratio*, Relação Sinal-Ruído).

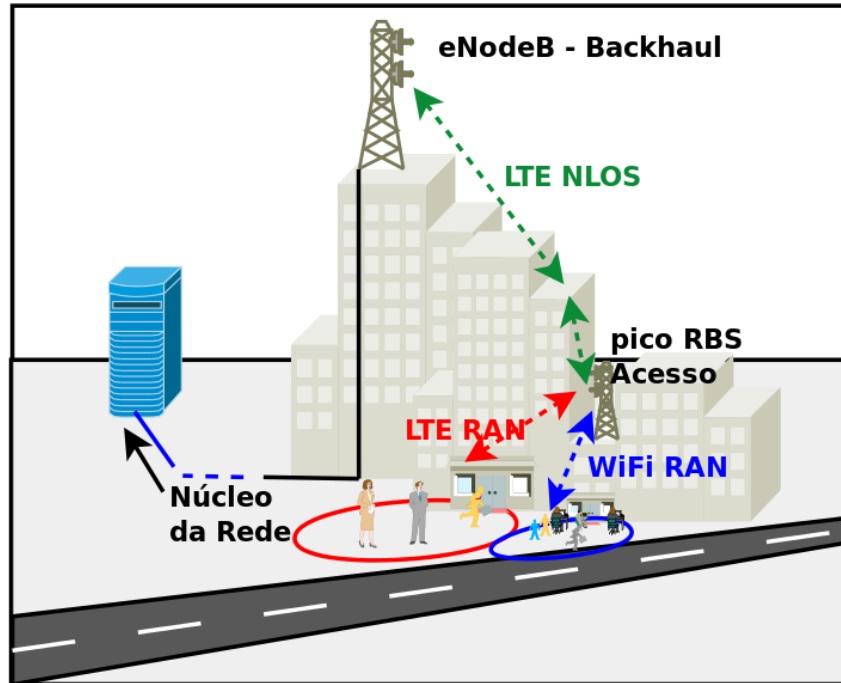


Figura 3.6: Representação de uma Pico RBS externa localizada em um cenário urbano, sendo conectada ao núcleo da rede através de um *backhaul* LTE NLOS (*Non-Line-Of-Sight*, sem linha de visada).

Apesar de visualmente semelhante, o cenário-alvo (representado na Figura 3.6) desta seção não trata de *relays*. O cenário-alvo inclui uma picoRBS capaz de se conectar com mais de uma tecnologia na rede de acesso, dando suporte à usuários LTE e WiFi. Considerando que o conceito de redes heterogêneas abrange inclusive redes de acesso compostas por diferentes tipos de tecnologias – incluindo o que vem sendo denominado como *wi-fi offloading*, onde pontos de acesso WiFi são utilizados para aliviar a carga da rede LTE – neste trabalho é considerado que o *backhaul* deve dar vazão e prover garantias de QoS para ambas as RANs (*Radio Access Networks*, Redes de Acesso) LTE e WiFi, o que não ocorre com *relay nodes*.

Este cenário é consideravelmente mais desafiador em comparação aos anteriormente citados dado que não existe ainda padronizado um dispositivo híbrido responsável tanto

por prover tráfego WiFi quanto LTE e que conecte-se à rede através de *backhaul* LTE *out-of-band* (em outra banda/frequências de transmissão que não as utilizadas para a rede de acesso). No capítulo a seguir serão descritas as soluções encontradas para modelagem deste tipo de cenário utilizando o simulador OPNET Modeler.

Capítulo 4

SIMULAÇÕES UTILIZANDO OPNET MODELER

Para tornar possível o planejamento de *backhaul* para redes móveis, foram realizadas simulações a eventos discretos utilizando o simulador de rede OPNET Modeler [10]. O OPNET proporciona um ambiente de simulação para modelagem de redes com alta precisão, permitindo ainda o desenvolvimento e otimização de módulos, processos ou protocolos, como a plataforma desenvolvida em [22].

Neste trabalho, o OPNET Modeler 17.5 foi utilizado para modelar cenários cujo alvo são redes de acesso compostas por pico-células LTE, visando estimar a demanda de tráfego exigida no *backhaul* destas pico-células, para então avaliar as soluções atualmente disponíveis capazes de compor este *backhaul*. A metodologia utilizada foi a de conduzir simulações levando em consideração indicadores de Qualidade de Serviço (QoS - *Quality of Service*), baseados nas recomendações de QoS especificadas para LTE pelo 3GPP, descritas na Tabela 4.1. Esta tabela foi baseada em [23], que divide os serviços em duas classes: GBR (*Guaranteed Bit Rate*, taxa de bits garantida) para aplicações com os requerimentos mais rigorosos, e Non-GBR (sem garantia de taxa de bits) para aplicações baseadas no protocolo TCP (www, email, p2p). Esta classificação de QoS foi implementada no OPNET através da configuração de EPS (*Evolved Packet System*) *bearers* – o sistema de controle de QoS específico da tecnologia LTE – visando otimizar a utilização

do *backhaul* para cada cenário. Neste sistema, são associados QCIs (*QoS Class Identifier*, Identificadores de Classes de QoS) para cada perfil de aplicação.

Tabela 4.1: Características padronizadas de QCI.

QCI	Tipo de Recurso	Atraso máximo (ms)	Perda de Pacote Máxima	Exemplos de Serviço
1	GBR	150 ms	10^{-2}	VoIP
2	GBR	300 ms	10^{-2}	Streaming de Video
3	GBR	50 ms	10^{-2}	Jogo em tempo real
6	Non-GBR	300 ms	10^{-6}	aplicações baseadas em TCP (www, email, p2p)

4.1 CENÁRIOS IMPLEMENTADOS

Os cenários implementados levam em consideração o futuro previsto para as redes móveis, cuja necessidade constante de aumento de capacidade e cobertura aponta no rumo da adoção de redes heterogêneas, onde células de diferentes tamanhos (macro, micro, pico, femto) operam conjuntamente com outras células de diferentes tecnologias (WiFi por exemplo) de modo a otimizar a qualidade de serviço.

4.1.1 Cenário A: Backhaul DSL

Um cenário comumente mencionado como parte do futuro das redes móveis são pontos de acesso implantados em locais de grande concentração de usuários, como *shopping centers*, pontos de ônibus, estações de trem, ruas comerciais, etc. Este cenário foi pensado como pico células LTE, abrangendo uma pequena área (100 m x 100 m) cada,

porém com alta capacidade para dar vazão à grande demanda de tráfego típica de usuários LTE.

Como *backhaul* de cenários como este, uma solução promissora seria utilizar infraestrutura já existente (cobre na maioria dos casos) já que capacidade não é (grande) problema considerando a área reduzida pela qual a estação rádio base LTE provê cobertura. Seria inviável economicamente em muitos casos para cada pico-célula implantar *backhaul* com fibra ótica ou outra tecnologia que incluísse despesas consideráveis com equipamentos caros ou procedimentos custosos para sua implantação.

Dado que a maioria destas pico-células encontram-se localizadas dentro (ou próximo) de prédios comerciais/armários telefônicos, utilizar pares trançados de cobre como *backhaul* destas micro células surge como uma solução de bom custo-benefício. De acordo com a capacidade da infra-estrutura disponível em cada área, com a distância e demanda de cada célula, diferentes tecnologias xDSL podem ser consideradas para compor este *backhaul*, conforme exposto na figura 4.1.

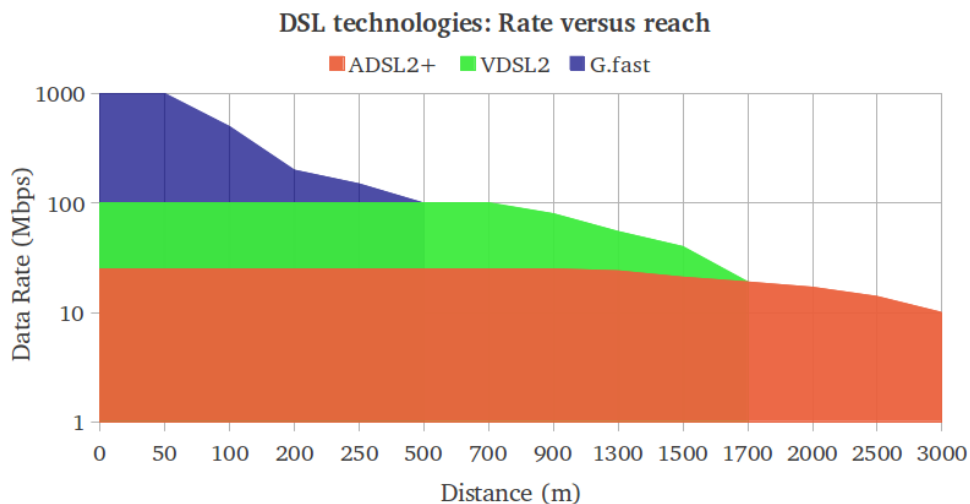


Figura 4.1: Taxa *versus* distância para diferentes tecnologias xDSL.

Em relação às tecnologias xDSL disponíveis atualmente, VDSL2 é a mais recentemente padronizada e já foi avaliada como *backhaul* por estudos como [24]. O próximo padrão DSL, denominado G.fast, atualmente está em processo de desenvolvimento pelo órgão competente (ITU-T) e é esperado para este padrão atingir taxas de até 1 Gbps em

curtas distâncias [25]. Também é viável economicamente o *upgrade* de VDSL2 para G.fast no caso de pico-células de alta demanda, especialmente se for levado em conta o custo para implantação de fibra óptica.

A Figura 4.1 indica que ADSL2+ pode atingir algumas dezenas de Mbps, VDSL2 alcança a ordem de 100 Mbps e G.fast 1 Gbps em até 50 metros. Também deve ser levado em conta que a disponibilidade de mais de um par trançado e técnicas para aumento de capacidade como *vectoring* e transmissão em modo fantasma [24,26] podem também elevar as taxas de transmissão.

Pensando em avaliar os requisitos para *backhaul* DSL em redes de acesso compostas por pico-células, o cenário ilustrado na figura 4.2 foi implementado no OPNET para simulações de tráfego *triple play*.

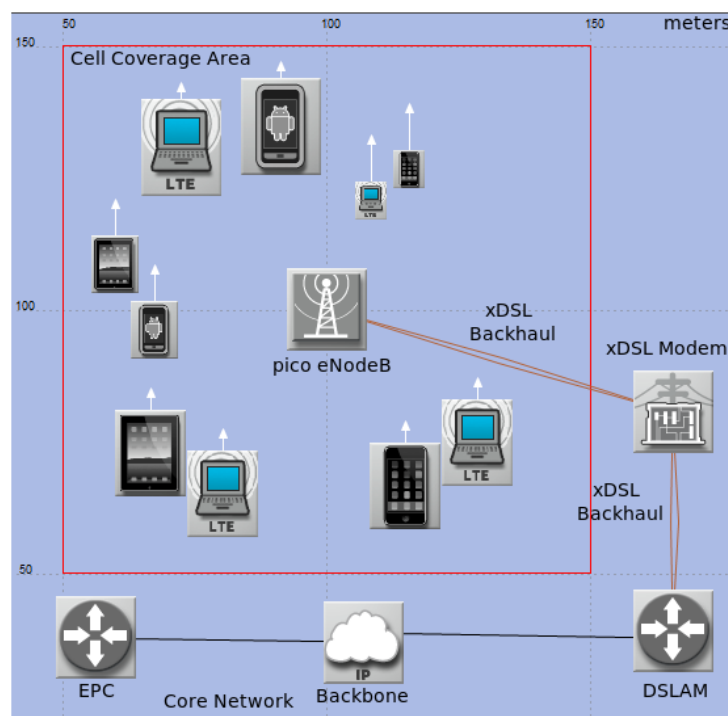


Figura 4.2: Cenário composto por micro-célula com *backhaul* DSL implementado no simulador OPNET.

Este contexto foi dividido em 3 simulações, considerando diferentes circunstâncias, detalhadas a seguir.

4.1.1.1 Simulação A.1

Nesta simulação, o tráfego foi modelado conforme descrito nas Tabelas 2.1 e 2.2 do Capítulo 2. O OPNET dispõe de diversos modelos de macro RBSs contudo não possui modelos de pico RBS. Para implementar um cenário contendo uma pico-célula, foram estudadas características típicas de pico-células em [27] e [5], sumarizadas na Tabela 4.2. Estes documentos descrevem uma pico-célula de área de cobertura de 100 m x 100 m com uma antena posicionada a 6 m do chão, tendo sua localização definida como “externa”, modelada na simulação através do modelo de propagação “*Outdoor to Indoor and Pedestrian Environment*” definido em [28]. Um dos modelos de *eNodeB* padrão do OPNET foi escolhido para customização e teve todos os parâmetros listados na tabela alterados para representar corretamente uma pico *eNodeB*.

Tabela 4.2: Características da pico-célula LTE, retiradas de [5].

Características da pico-célula	
Potência de transmissão da <i>eNodeB</i>	24 dBm
Velocidade do UE	3 Km/h
Largura de Banda	10 MHz
Altura da antena	6 m
Ganho da antena	2 dBi
Tipo da antena	omnidirecional
Área da célula	100 m x 100 m
Frequência da portadora	2 GHz

Para a pico-célula foram inseridos 20 usuários, sendo categorizados conforme recomendado em [16]: 10% usuários FTP, 20% usuários HTTP, 20% usuários de vídeo, 30% usuários de voz e 20% usuários de jogos.

4.1.1.2 Simulação A.2

Nesta simulação, o tráfego foi modificado para caracterizar uma demanda que se aproxima de redes de acesso LTE-Advanced: ainda consiste de uma pico-célula LTE pois o OPNET não possui um módulo LTE-Advanced para que um cenário completo 4G pudesse ser modelado. A implementação de um módulo LTE-A por si só já demandaria a complexidade e tempo de uma dissertação, além de fugir do foco deste trabalho na pesquisa e avaliação de requerimentos de *backhaul* para redes móveis. Logo, levando em conta também a proximidade das duas tecnologias (LTE/LTE-A), para esta simulação foram modelados usuários de vídeo de alta definição: uma resolução UHD (*Ultra High Definition*) considerando o uso de codec HEVC (*High Efficiency Video Coding*) [29] demandando aproximadamente uma taxa de 12 Mbps para cada usuário de vídeo.

Por ser um padrão de codec de vídeo recente (aprovado em 13 de abril de 2013 como um padrão ITU-T), HEVC não foi implementado no OPNET e para gerar este tipo de tráfego uma aplicação de *streaming* de vídeo HDTV (Televisão de Alta Definição) com resolução de 1280 x 720 pixels com taxa de quadros de 14 fps foi adotada, de maneira a atingir a demanda-alvo de 12 Mbps. O número, proporção de cada tipo de usuários e suas aplicações permaneceu o mesmo do apresentado na Simulação A.1.

4.1.1.3 Simulação A.3

Na simulação A.3 o número de usuários foi aumentado para 40 e a proporção dos usuários foi alterada, sendo 50% usuários de vídeo HDTV, 20% usuários FTP e os demais 30% divididos igualmente entre usuários HTTP, VoIP e Jogos. A proporção de usuários de vídeo foi aumentada para atingir uma demanda ainda maior por tráfego, simulando uma pico-célula localizada por exemplo em grandes eventos como campeonatos de esporte e shows, onde muitos usuários costumam realizar streaming de vídeo.

4.1.2 Cenário B: Backhaul LTE

Outro cenário válido para investigação conforme indicado no Capítulo 3 é considerando *backhaul* LTE (com e) sem linha de visada. Para este tipo de cenário, conforme

mencionado no Capítulo 3 não há padronização e conseqüentemente também não há implementação no OPNET ou em outro simulador a eventos discretos dos módulos necessários para a montagem deste cenário. Neste contexto, este trabalho contribui fornecendo a implementação deste cenário no OPNET através da customização de módulos e conexões para que a pico RBS indicada na Figura 3.6 pudesse ser modelada no OPNET, dando vazão a tráfego LTE e WiFi com QoS com modelagem de perda de percurso.

Indicados pelo quadrado desenhado na Figura 4.3, os módulos *Access eNodeB*, *Switch*, *UE_eNodeB_Router* e *WiFi AP* compõem a “pico RBS” responsável pelo acesso dos usuários LTE e WiFi. Estes módulos foram interconectados utilizando enlaces ethernet de 10 Gbps para garantir que o gargalo da rede ficasse por conta do *backhaul*.

O núcleo da rede é composto por enlaces PPP (*Point-to-Point*) SONET OC-192, de alta capacidade, também para garantir que o gargalo da rede permaneça no *backhaul*. BHeNB (*Backhaul eNodeB*) representa a LTE *eNodeB* responsável pelo *backhaul* LTE.

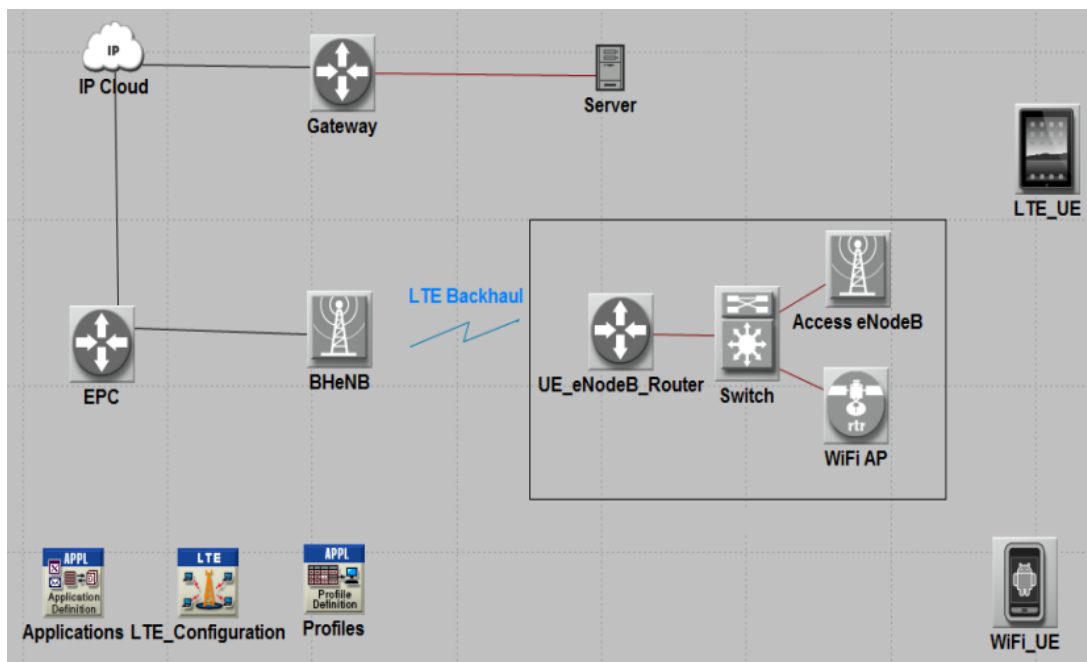


Figura 4.3: Implementação do cenário contendo *backhaul* LTE para redes de acesso LTE e WiFi no OPNET.

O *UE_eNodeB_Router* é o módulo chave para habilitar a conexão LTE da rede de

acesso com o *backhaul*, por possuir funcionalidade de UE *User Equipment*, *equipamento do usuário* sendo capaz de vincular-se à rede LTE como se fosse um usuário final, e interface ethernet para ser conectado com os demais módulos responsáveis por prover acesso para os “verdadeiros” usuários finais. No modelo LTE implementado no OPNET, o UE (ou no caso, o *UE_eNodeB_Router* com funcionalidade de UE) é configurado para uma única HPLMN (*Home Public Land Mobile Network*, Rede Doméstica) – Rede Móvel Terrestre Pública situada em um Estado-Membro utilizada por operadora nacional para a oferta de serviços. A HPLMN é definida em [30] como uma PLMN onde os identificadores MCC (*Mobile Country Code*, código do país) e MNC (*Mobile Network Code*, código da rede) condizem com os MCC e MNC do IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*, identidade única do usuário da rede). Uma PLMN é responsável por prover acesso móvel aos usuários. A HPLMN do *UE_eNodeB_Router* é identificada pelo ID do módulo EPC (*Evolved Packet Core*) mostrado na figura 4.3. Este ID é definido no módulo *UE_eNodeB_Router* e ao iniciar a simulação, o processo de rastreamento e seleção da *eNodeB* que irá servir este módulo incluirá apenas as *eNodeBs* desta rede/EPC. Para garantir que o *UE_eNodeB_Router* se vincule à *eNodeB* correta, também foi definido neste o id da BHeNB para que esta sempre seja selecionada (e ele não escolha a *eNodeB* responsável pelo tráfego do módulo LTE_UE).

Na Figura 4.4 são ilustrados os *process models* típicos de um módulo de UE que compõem o *UE_eNodeB_Router*. Este processo de busca e escolha das *eNodeBs* presentes na rede é realizado pelo *process model* *lte_as*. Uma vez selecionada a *eNodeB*, o *process model* *lte_as* transmite as informações para o *lte_nas* para que este inicie os procedimentos necessários para vincular o *UE_eNodeB_Router* à rede através da *eNodeB* selecionada. Os módulos *lte_ant*, *lte_port_rx* e *lte_port_tx* são responsáveis por receber e transmitir respectivamente as informações enviadas pela camada física LTE do módulo, representada pelo *process model* *phy*.

Os demais *process models* são responsáveis pela conexão ethernet do *UE_eNodeB_Router* e pelos protocolos implementados para transmitir os sinais/pacotes/frames pelas demais camadas do módulo.

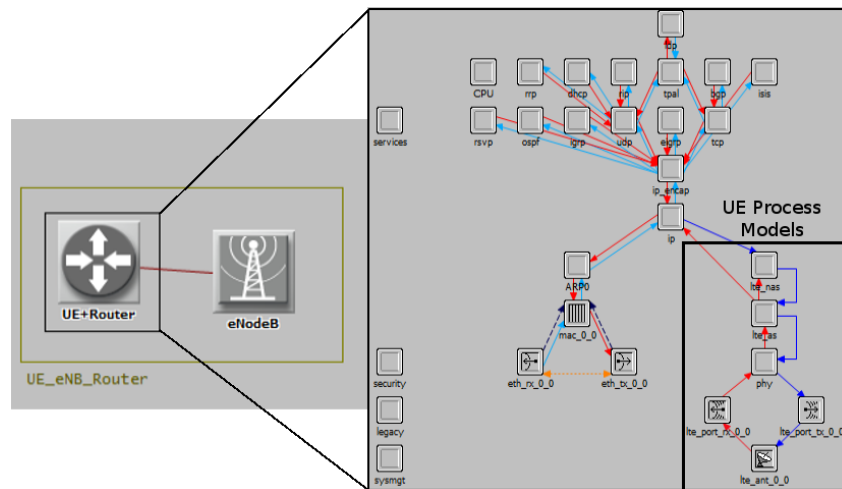


Figura 4.4: Implementação do cenário contendo *backhaul* LTE para redes de acesso LTE e WiFi no OPNET.

4.1.2.1 Simulação B.1

A simulação B.1 foi planejada visando a validação do módulo criado para estabelecer o *backhaul* LTE no cenário B. A interface LTE do módulo *UE_eNodeB_Router* possui diversos parâmetros para configuração, sendo os mais relevantes listados na Tabela 4.3. A Tabela associa estes parâmetros com os valores correspondentes adotados com base nos resultados obtidos nas diversas execuções desta simulação, através de ajustes sucessivos em cada um, já que diferentemente do cenário A este cenário não possui relatórios técnicos ou documentos oficiais orientando quais suposições devem ser feitas. Vale ressaltar que visando evitar interferências entre o *backhaul* LTE e a rede de acesso LTE, diferentes frequências iniciais e larguras de bandas (10 MHz no *backhaul* e 20Mhz na rede de acesso LTE) foram utilizadas nas *eNodeBs*.

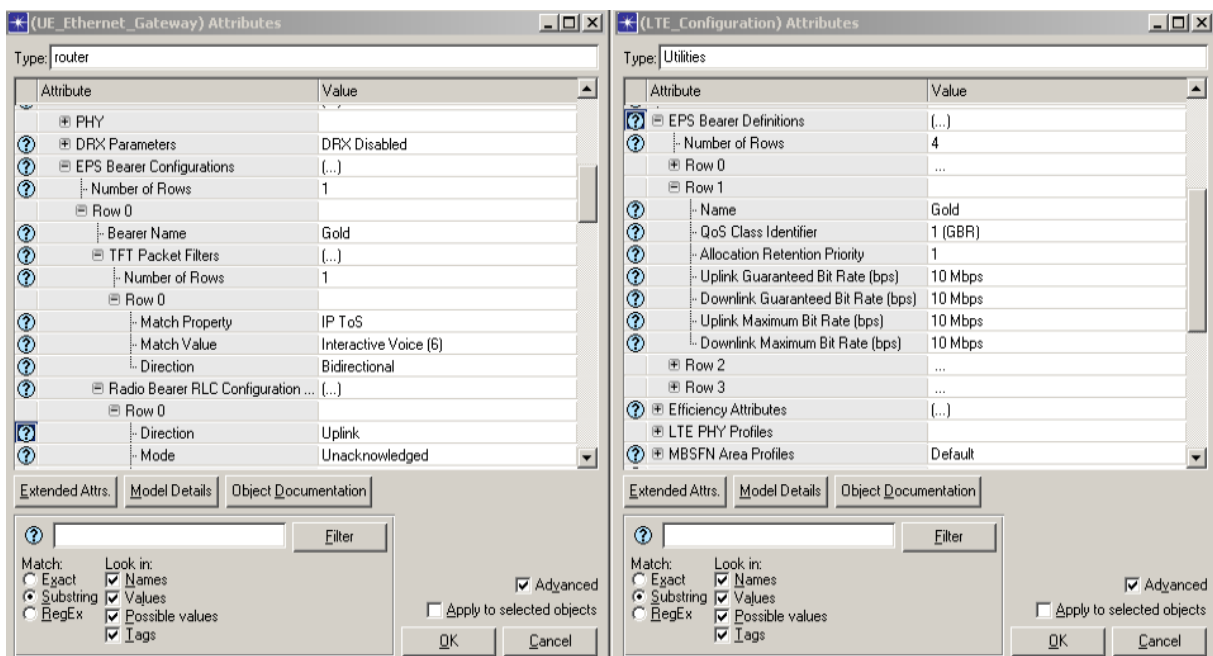
Este módulo também habilita o uso de EPS *bearers*, classificando o tráfego de acordo com as prioridades desejadas pelo usuário.

O painel de configuração das EPS *bearers* é mostrado na Figura 4.5. Até 8 diferentes *bearers* podem ser configuradas, e no mínimo cada UE tem uma *bearer* “padrão” do tipo Non-GBR, que é estabelecida assim que o UE é atrelado à PLMN/EPC.

Para que as *bearers* tenham utilidade, estas devem ser configuradas em ambos os

Tabela 4.3: Parâmetros de configuração presentes no módulo *UE_eNodeB_Router*.

Características da pico-célula	
Potência de transmissão	2 W
Número de antenas de transmissão	1
Número de antenas de recepção	1
Ganho da antena	14 dBi
Frequência da portadora	2,4 GHz
Largura de banda	10 Mhz

Figura 4.5: Painel de configuração de EPS *bearers*.

painéis (*UE_eNodeB_Router* e o módulo de configuração LTE) mostrados na Figura 4.5 e ainda ao definir a aplicação para a qual é desejado o controle de QoS. Esta aplicação deve ter seu tipo de serviço (ToS - *Type of Service*) configurado de acordo com o tipo de serviço alvo definido na EPS *bearer* (no exemplo da figura, representado por *Interactive*

Voice).

O tráfego de camadas mais altas que não seja possível de ser mapeado para nenhuma das EPS *bearers* configuradas é servido pela *bearer* padrão. O QCI associa *bearers* com uma definição de QoS com os mesmos parâmetros/valores fornecidos em [23]. As requisições de *bearers* GBR passam pelo procedimento de controle de admissão, já que existe uma certa quantidade de recursos na célula LTE reservado para este tipo de *bearer*. O fluxo de dados em *bearers* GBR também é monitorado, e se esta tornar-se inativa por um determinado período de tempo (que pode ser configurado especificamente para o cenário desejado) seus recursos são liberados e esta é desativada. Caso surja novamente um SDF (*Service Data Flow*, fluxo de dados) ativo nesta *bearer*, ela é reativada.

Caso a requisição de criação de uma *bearer* GBR seja rejeitada pelo controle de admissão, os pacotes enfileirados para esta *bearer* são descartados ou redirecionados para a *bearer* Non-GBR padrão (parâmetro também configurável durante a simulação). Se novamente um SDF ficar ativo para esta *bearer*, é realizada uma nova requisição para ativação desta *bearer*. Preempção por controle de admissão também é suportado no módulo LTE do OPNET. Neste caso, quando uma célula se torna congestionada, *bearers* GBR com alto ARP (*Allocation Retention Priority*, baixa prioridade) sofrem preempção de modo a liberar recursos da célula para que uma *bearer* de maior prioridade (menor ARP) seja admitida.

O OPNET também possui procedimentos de adaptação do enlace baseados nas condições do canal que alteram o MCS (*Modulation and Coding Scheme*, esquema de modulação e codificação) do UE, e se esta alteração excede um limiar definido, os recursos solicitados pela *bearer* GBR ativa são reavaliados pela entidade de controle de admissão da *eNodeB*. Se o novo índice MCS for mais baixo, os recursos necessários para que a *bearer* GBR ativa garanta a qualidade de serviço para o UE podem não estar mais disponíveis na célula nestas novas condições de carga. Neste caso, a *eNodeB* deve liberar a(s) *bearer(s)*, utilizando um procedimento similar ao de liberação da *bearer* por inatividade ou preempção.

Para atestar a solução proposta como adequada para avaliação de cenários contendo *backhaul* LTE no simulador OPNET, parâmetros como *throughput*, atraso e QoS para aplicações de voz foram analisados e os resultados apresentados no Capítulo 5.

Capítulo 5

RESULTADOS

Neste trabalho foram levantados requisitos e avaliadas soluções de *backhaul* para pico-células de redes de acesso LTE. Através do OPNET Modeler foram implementados os cenários descritos no Capítulo 4 e modelados dispositivos para habilitar as simulações dos cenários propostos.

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com as simulações descritas no Capítulo 4 referentes aos requerimentos de *backhaul* DSL e LTE para redes móveis.

5.1 RESULTADOS PARA BACKHAUL DSL

Nestas simulações o objetivo foi avaliar os requerimentos principais para *backhaul* de pico-células considerando a carga máxima que pode ser demandada pelos usuários LTE. Através destes resultados, descobertas como utilização ótima do *backhaul*, tecnologias DSL necessárias para cada cenário e garantias de QoS foram realizadas.

A Figura 5.1 indica para os 3 cenários simulados (descritos no Capítulo (4)) a vazão em *busy time*, com 20 usuários ativos simultaneamente, divididos em FTP, HTTP, jogos, VoIP e *streaming* de vídeo para as simulações A.1 e A.2. Para a simulação A.3, 40 usuários ativos (com os mesmos perfis) foram modelados, sendo os usuários de vídeo 50% do total conforme descrito no Capítulo 4. A Figura 5.1 indica que a vazão máxima obtida

em cada simulação (A.1, A.2 e A.3) foi de aproximadamente 48, 100 and 500 Mbps para estes três cenários, respectivamente. Os primeiros 100 segundos de simulação ilustrados na Figura 5.1 são reservados para inicialização (configuração das tabelas de roteamento) e somente pequenos picos são observados no tráfego no *backhaul*. Após este intervalo de tempo, usuários iniciam suas aplicações de acordo com as distribuições descritas na Tabela 2.1 do Capítulo 2 e o tráfego no *backhaul* considerando o somatório de todas as demandas dos usuários é estabilizado.

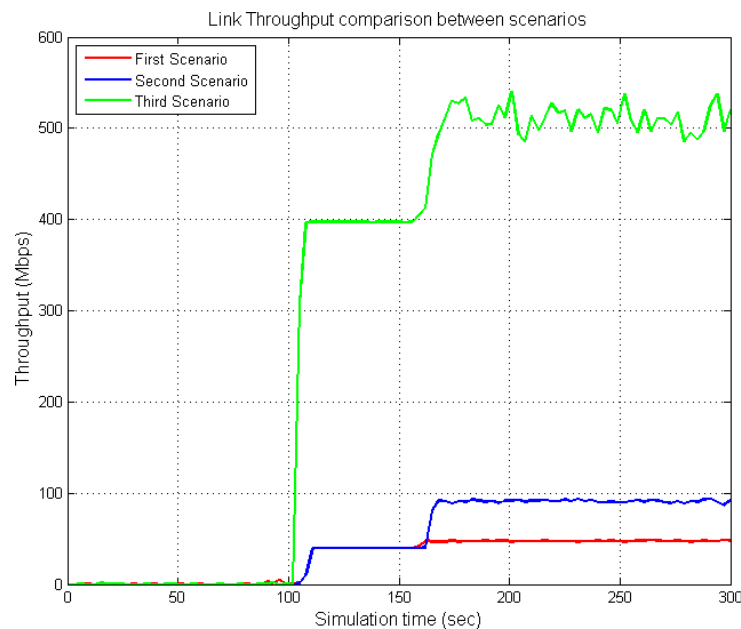


Figura 5.1: Vazão no *backhaul* para as Simulações A.1, A.2 e A.3. Todos os usuários estão ativos após 150 segundos do início da simulação.

A Figura 5.2 mostra os resultados de atraso de pacote obtidos para cada aplicação na Simulação A.1. Este é o resultado de uma após varias simulações cujo foco foi encontrar a carga de tráfego que o *backhaul* DSL poderia suportar neste cenário, garantindo os requerimentos de Qualidade de Serviço especificados para LTE na Tabela 4.1, levando em conta que cada aplicação tem suas demandas de tráfego e classificação QoS características. A aplicação FTP por exemplo tem uma variação de atraso de 0 a 50 ms devido à sua característica de tráfego “ em rajadas”, modelada de acordo com a Tabela2.2.

Os valores de atraso apresentados na Figura 5.2 para a Simulação A.1 foram obtidos

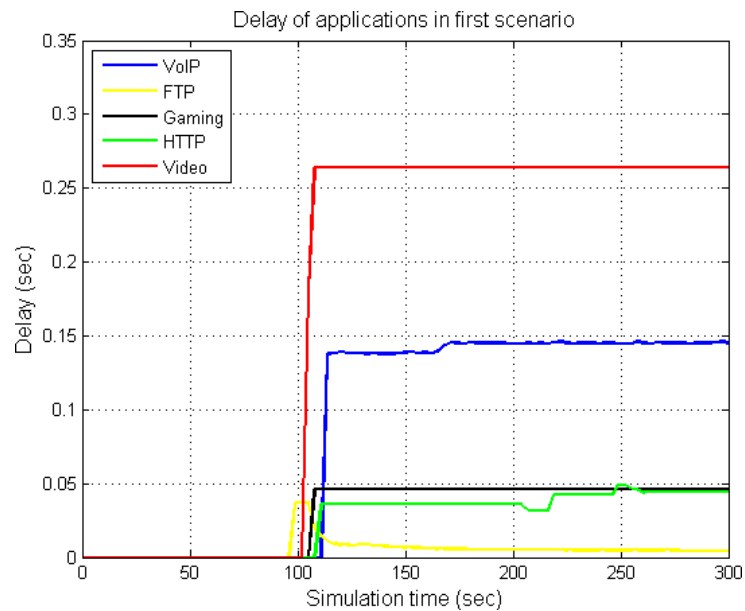


Figura 5.2: Atraso por aplicação para Simulação A.1 com uma utilização de 50% do *backhaul*.

com um enlace *backhaul* VDSL2 de 100 Mbps, o que implica uma utilização de 50%. As simulações demonstraram que com uma carga maior os limites de QoS estabelecidos na Tabela 4.1 não foram atendidos. Vale notar que um enlace VDSL2 não deve ultrapassar 700 metros de comprimento para ser capaz de prover tamanha taxa de dados.

Os resultados de atraso de pacote para a Simulação A.2 indicaram que uma utilização de 50% também não deve ser excedida considerando os requerimentos de QoS, e similarmente, enlaces de *backhaul* G.fast atingem 200 Mbps em no máximo 200 metros, logo a pico RBS não pode estar localizada mais distante que isso do modem DSL /DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*) para cenários propostos nesta simulação.

As estatísticas de atraso de pacote por aplicação para a Simulação A.3 indicam uma utilização ótima de 55% do *backhaul*, indicando que esta deve ser a carga máxima que deve ser atingida neste enlace considerando atender aos requisitos de QoS. Valores abaixo ou acima deste, como 40 ou 60% mostrados na Figura 5.3, levaria a uma subutilização do enlace ou excederia os limites de atraso de pacote aceitáveis. Estes resultados de utilização ótima foram obtidos com um *backhaul* composto por um enlace G.fast de capacidade de

1 Gbps. Com uma vazão em torno de 550 Mbps no *backhaul*, os atrasos fim-a-fim das aplicações de vídeo e de jogo em tempo-real (duas das aplicações mais exigentes em termos de atraso) alcançaram ou ficaram bem próximo dos limites aceitáveis de atraso estabelecidos pelos paradigmas de qualidade de serviço definidos em [23].

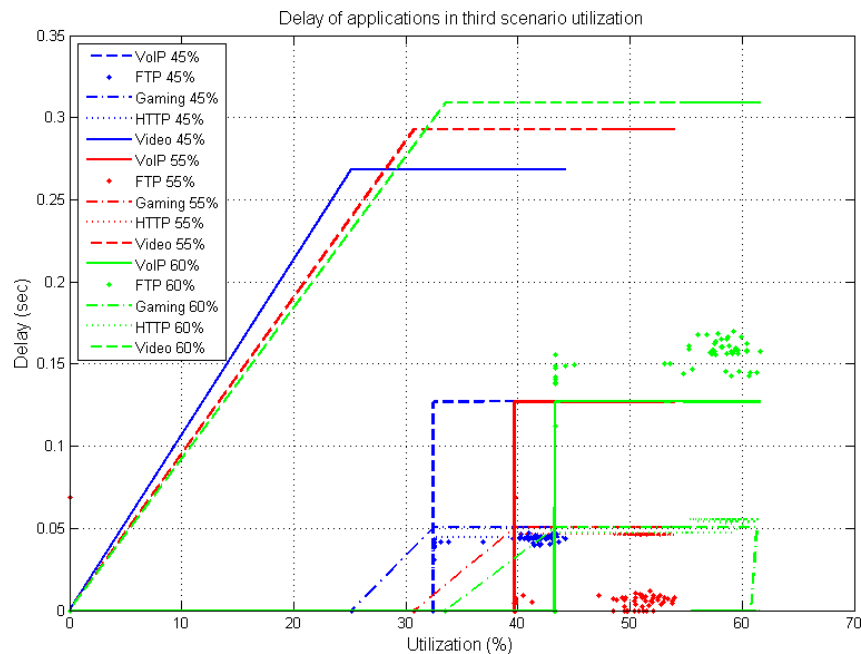


Figura 5.3: Simulação A.3: atrasos de cada aplicação para diferentes utilizações do *backhaul* em 40%, 55% e 60%.

Neste cenário, apenas o padrão DSL G.fast é capaz de sustentar o tráfego com QoS, o que limita o comprimento do enlace *backhaul* a 50 metros, conforme indicado na Figura 4.1 do Capítulo 4.

Os resultados a seguir foram obtidos simulando um cenário que foca em um número ainda maior de usuários móveis, contendo 10 usuários de VoIP, 4 usuários de vídeo, 2 usuários de jogos, 1 usuário HTTP e 1 usuário FTP. Os resultados mostrados nas Figuras 5.5 e 5.4 revelaram que, considerando este novo cenário, independente da tecnologia DSL presente no backhaul (VDSL2 or G.fast) a utilização do enlace precisa respeitar um limite de 70% para que os usuários sejam servidos com QoS: aplicações de VoIP e vídeo tem seus limites de atraso excedidos com uma utilização maior que 70%, como é mostrado na Figura 5.4, o que reitera que não há solução única e absoluta para cenários de redes

móveis do futuro, ainda mais se tratando de cenários contendo redes heterogêneas. Nos cenários com pico-células LTE, os requerimentos do backhaul dependem majoritariamente das características de tráfego dos usuários.

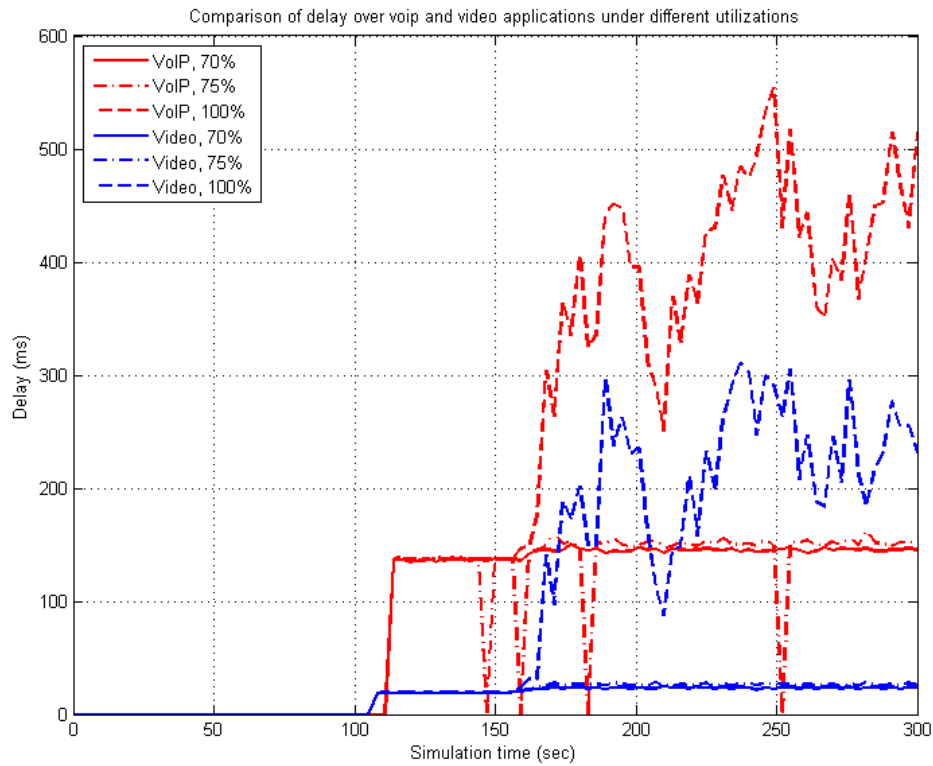


Figura 5.4: Atrasos de aplicação com diferentes utilizações do backhaul VDSL2.

A Figura 5.6 faz uma comparação entre todos os resultados de atraso para cada aplicação obtidos com enlace backhaul de VDSL2 e G.fast. O backhaul G.fast (com valores de RTT - *Round Trip delay Time*, atraso de ida e volta - menores que VDSL2) provê melhores resultados de atraso para todas as aplicações, contudo o backhaul VDSL2 também é capaz de prover tráfego com QoS para os usuários de pico-células LTE.

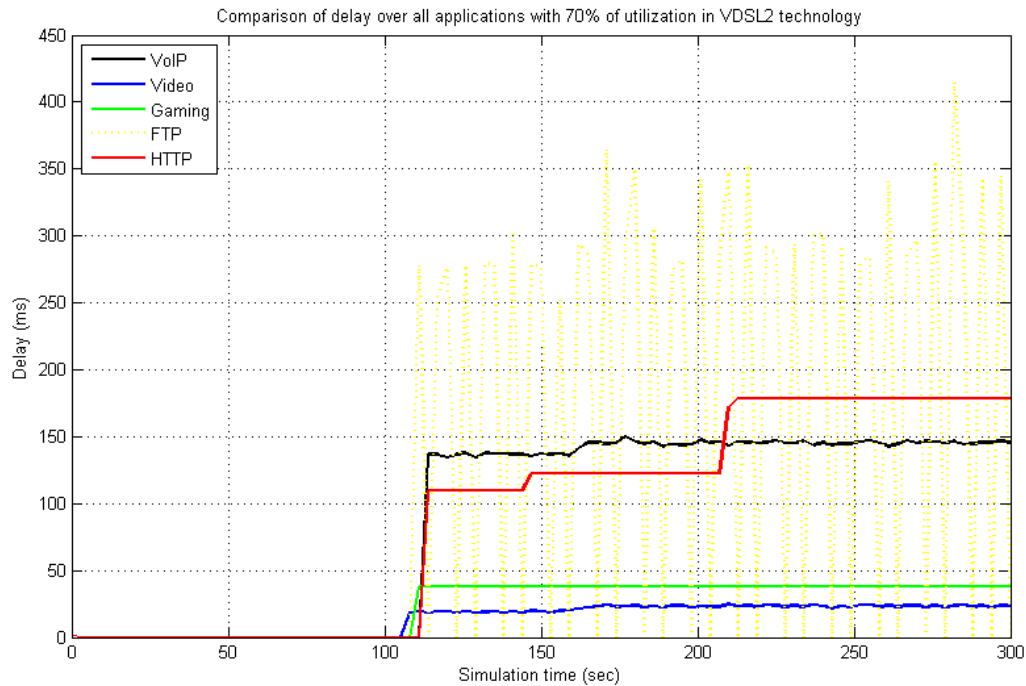


Figura 5.5: Backhaul VDSL2 com utilização de 70%, com taxa de 60 Mbps de *uplink* e 90 Mbps de *downlink*.

5.2 RESULTADOS PARA BACKHAUL LTE

Como previamente mencionado, os resultados para a solução de backhaul LTE proposta implementada no OPNET possuem o papel de atestar a funcionalidade da mesma. A preocupação inicial foi a de atestar que o módulo seria capaz de enviar e receber tráfego em ambos os usuários LTE e WiFi, os quais foram configurados para solicitar aplicações de FTP e VoIP respectivamente, conforme exibido na Figura 5.7. Estas aplicações mantiveram a modelagem proposta no Capítulo 2.

Validada a transmissão e recepção em ambas as redes de acesso através do backhaul LTE, outro ponto importante era se o tráfego WiFi também seria passível de classificação de acordo com o tipo de serviço e se esta classificação seria reconhecida e corretamente tratada pelo backhaul LTE. Foi por este motivo que um usuário de VoIP, uma das aplicações mais exigentes em relação a qualidade de serviço conforme demonstrado na Tabela

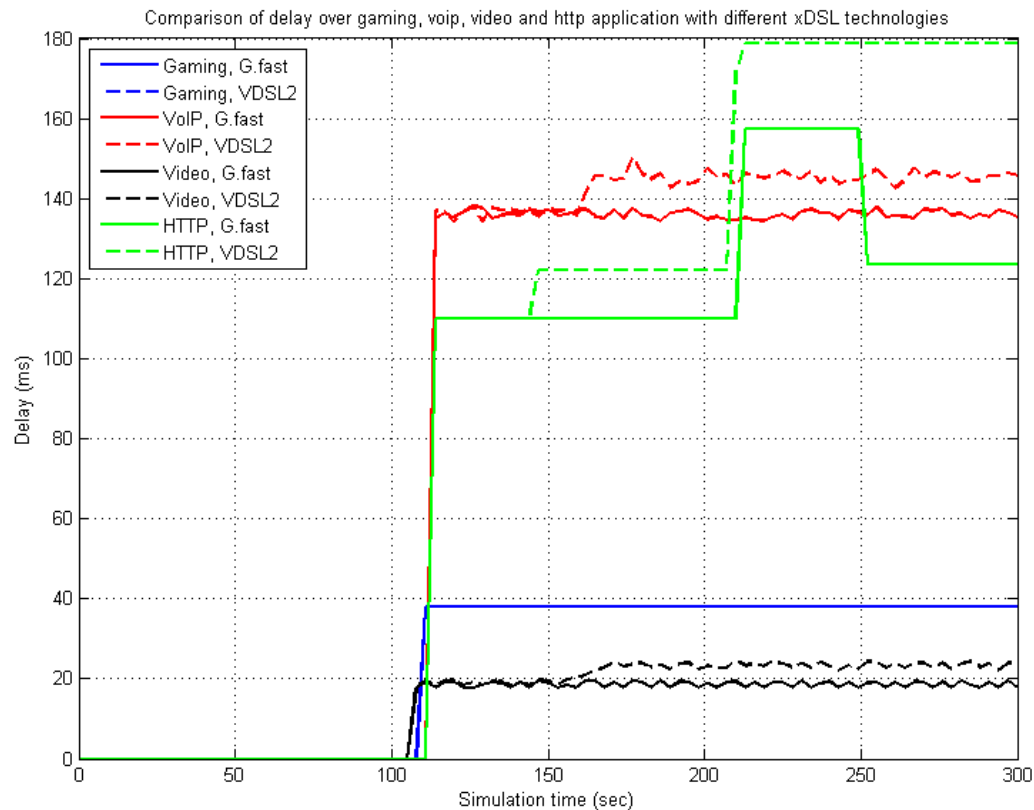


Figura 5.6: Atrasos de aplicação obtidos com enlace de backhaul VDSL2 e G.fast.

4.1, foi escolhido para conectar-se na rede WiFi para que testes envolvendo a configuração de EPS bearers no backhaul LTE pudessem refletir a melhora na qualidade de serviço deste usuário mesmo ele não estando em uma rede de acesso LTE, conforme demonstrado na Figura 5.8.

As simulações que resultaram nas estatísticas da Figura 5.8 foram obtidas com uma definição de uma *gold* EPS bearer (mostrada como exemplo na Figura 4.5) onde esta bearer está configurada para transportar com QoS tráfego de voz (*Interactive Voice*). Esta bearer foi determinada no módulo *UE_eNodeB_Router* e no módulo de configuração geral LTE, assim como a aplicação de VoIP teve seu ToS configurado para *Interactive Voice*. A Figura 5.8 mostra que nos períodos de tempo onde os recursos do backhaul foram divididos entre as aplicações FTP e VoIP, o atraso na aplicação de VoIP sofreu picos de mais de

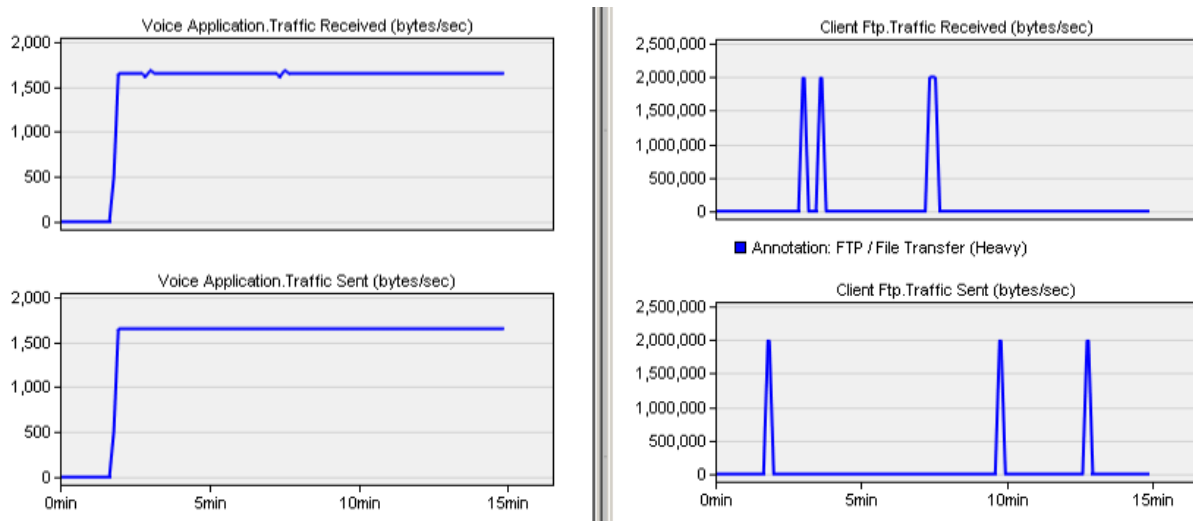


Figura 5.7: Tráfego sendo enviado e recebido pelo usuário LTE, com aplicação FTP (direita) e pelo usuário WiFi, com aplicação VoIP (esquerda).

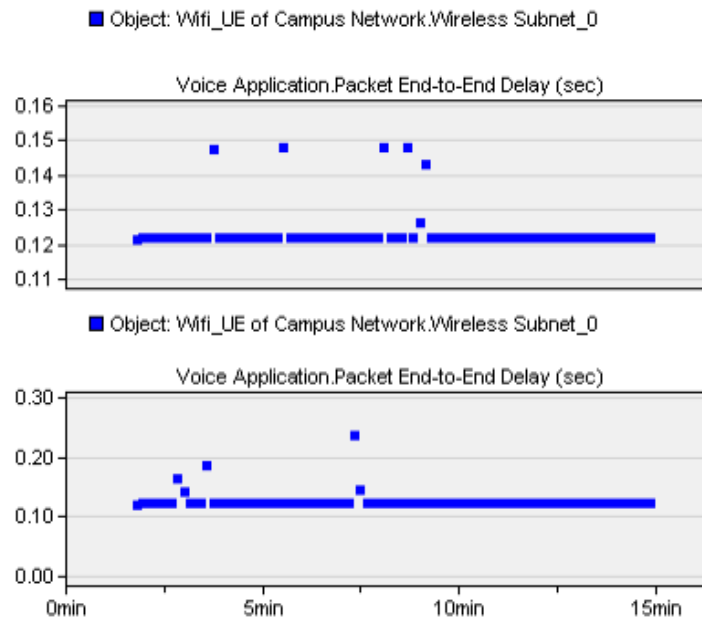


Figura 5.8: Resultados de atraso fim a fim obtidos com simulação sem o uso de EPS bearers para tráfego de VoIP (abaixo) e com o uso de EPS bearers (acima).

200 ms, ultrapassando os 150 ms recomendados pela Tabela 4.1. Contudo, ao dedicar

uma EPS bearer para o tráfego de voz, mesmo este sendo oriundo de uma outra rede de acesso que não a LTE, o backhaul foi capaz de garantir recursos para esta aplicação mesmo nos momentos onde a aplicação FTP iniciou sua transmissão, garantindo o atraso máximo de 150 ms definido para o usuário de voz WiFi.

Capítulo 6

CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma preocupação cada vez mais presente nas redes de telefonia móvel é a de garantir qualidade de serviço principalmente para as aplicações mais exigentes como voz e vídeo em tempo real. Esta dissertação propôs uma solução de *backhaul* sem fio utilizando tecnologia LTE fora da banda de transmissão usual capaz de classificar diferentes tipos de serviço em redes heterogêneas, assim como avaliou o *backhaul* de pico-células LTE utilizando tecnologia DSL levantando os requerimentos necessários para dar vazão à tráfego *triple-play* característico de pico-células de redes heterogêneas.

O simulador OPNET foi utilizado para realizar simulações em cenários LTE e LTE-Advanced levando em consideração o provisionamento de qualidade de serviço. Os resultados indicaram as condições nas quais enlaces backhaul com tecnologia VDSL2 e G.fast são capazes de garantir a demanda de tráfego com QoS. O padrão VDSL2 consegue garantir 100 Mbps em distâncias de até 700 m, o que se mostrou suficiente para o primeiro cenário simulado (A.1) considerando tráfego típico de redes móveis atuais. O G.fast é capaz de prover até 1 Gbps em até 50 m, o que foi considerado uma solução viável no cenário abordado representando o esperado como tráfego para o futuro das redes móveis em LTE-Advanced. Considerando o tráfego assumido, a utilização do *backhaul* deve ser limitada a 50% da capacidade total neste caso para garantir qualidade de serviço à todas

as aplicações modeladas.

Este trabalho contribuiu com uma solução para simulação de *backhaul* LTE capaz de dar vazão e prover qualidade de serviço para redes de acesso heterogêneas WiFi e LTE, assim como levantou requerimentos de *backhaul* para pico-células utilizando soluções eficientes em termos de custo envolvendo tecnologia DSL.

Parte dos resultados obtidos com este trabalho foram publicados na *International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC*, através de artigo intitulado “Requirements and Evaluation of Copper-Based Mobile Backhaul for Small Cells LTE Networks” em Agosto de 2013.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

A continuação deste trabalho foca na utilização da solução proposta para simulação de *backhaul* LTE para:

- Estudar mitigação de interferência entre diversas pico-células de acesso LTE e a *eNodeB* responsável pelo tráfego no *backhaul* LTE;
- Comparar diferentes modelos de perda de percurso considerando fornecer resultados para um número mais abrangente de cenários, envolvendo macro-estações rádio base atuando como BHeNB, pico-células situadas em ambientes internos e externos, etc;
- Avaliar a capacidade de *backhaul* LTE sem linha de visada e a influência de seus efeitos sobre a qualidade de serviço percebida pelos usuários da redes de acesso comparada com a fornecida por um *backhaul* LTE com linha de visada.

Referências Bibliográficas

- [1] R. Krzanowski, *Metro Ethernet Services for LTE Backhaul*, Artech House Publishers, 2013.
- [2] Heavy Reading and Tellabs, “Small Cell Backhaul: What Why and How?,” 2012.
- [3] “Tellabs,” <http://www.tellabs.com/>.
- [4] C. Hoymann, Wanshi Chen, J. Montojo, A. Golitschek, C. Koutsimanis, and Xiaodong Shen, “Relaying operation in 3gpp lte: challenges and solutions,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 50, no. 2, pp. 156–162, 2012.
- [5] “Radio Frequency (RF) requirements for LTE pico NodeB,” 2012, 3GPP TR 36.931 V11.0.0.
- [6] D. Gómez-Barquero, *Next Generation Mobile Broadcasting*, Taylor & Francis, 2013.
- [7] T. Nicklin, K. Meyer, R. Hardy, and N. Wilkins, *Cambridge Marketing Handbook: Digital*, Cambridge Marketing Handbooks. Kogan Page, 2013.
- [8] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*, Elsevier Science, 2011.
- [9] X. Chu, D. Lopez-Perez, Y. Yang, and F. Gunnarsson, *Heterogeneous Cellular Networks: Theory, Simulation and Deployment*, Heterogeneous Cellular Networks: Theory, Simulation, and Deployment. Cambridge University Press, 2013.
- [10] “Opnet Modeler,” <http://www.opnet.com/>.

-
- [11] K. Wehrle, M. Günes, and J. Gross, *Modeling and Tools for Network Simulation*, Springer, 2010.
- [12] 3GPP, ,” 3rd Generation Partnership Project.
- [13] A. Damnjanovic, J. Montojo, Y. Wei, T. Ji, T. Luo, M. Vajapeyam, T. Yoo, O. Song, and D. Malladi, “A survey on 3GPP heterogeneous networks,” *IEEE Wireless Communications*, pp. 10–21, 2011.
- [14] “Technical specification group radio access network; LTE radio access network (RAN) enhancements for diverse data applications,” 2012, 3GPP TR 36.822 V11.0.0.
- [15] NGMN, “Guidelines for LTE Backhaul Traffic Estimation,” 2011, Next Generation Mobile Networks.
- [16] NGMN, “Radio Access Performance Evaluation Methodology,” 2008, Next Generation Mobile Networks.
- [17] C.S. Ranaweera, P.P. Iannone, K.N. Oikonomou, K.C. Reichmann, and R.K. Sinha, “Design of cost-optimal passive optical networks for small cell backhaul using installed fibers [invited],” *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, vol. 5, no. 10, pp. A230–A239, 2013.
- [18] M. Coldrey, J.-E. Berg, L. Manholm, C. Larsson, and J. Hansryd, “Non-line-of-sight small cell backhauling using microwave technology,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 51, no. 9, pp. 78–84, 2013.
- [19] V. Jungnickel, K. Manolakis, S. Jaeckel, M. Lossow, P. Farkas, M. Schlosser, and V. Braun, “Backhaul requirements for inter-site cooperation in heterogeneous lte-advanced networks,” in *Communications Workshops (ICC), 2013 IEEE International Conference on*, 2013, pp. 905–910.
- [20] C. Ranaweera, M.G.C. Resende, K. Reichmann, P. Iannone, P. Henry, Byoung-Jo Kim, P. Magill, K.N. Oikonomou, R.K. Sinha, and S. Woodward, “Design and optimization of fiber optic small-cell backhaul based on an existing fiber-to-the-node residential access network,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 51, no. 9, pp. 62–69, 2013.

-
- [21] Next Generation Mobile Networks, “NGMN Optimised Backhaul Requirements,” 2008.
- [22] E.C. Reyes, D.M. Gutierrez-Estevez, and I.F. Akyildiz, “A complete femtocell network modeling and development platform,” in *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2012 IEEE*, 2012, pp. 5142–5147.
- [23] “Technical specification group services and system aspects; policy and charging control architecture,” 2013, 3GPP TS 23.203 V12.0.0.
- [24] Jonas Hansryd and Per-Erik Eriksson, “High-speed mobile backhaul demonstrators,” *Ericsson Review*, , no. 2, 2009.
- [25] P. Ödling, T. Magesacher, S. Höst, P. O. Börjesson, M. Berg, and E. Areizaga, “The fourth generation broadband concept,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 47, no. 1, pp. 62 –69, january 2009.
- [26] Pavel Lafata, Petr Jares, and Jiri Vodrazka, “Increasing the transmission capacity of digital subscriber lines,” *35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, pp. 292–296, 2012.
- [27] NGMN, “Small Cell Backhaul Requirements,” 2012, Next Generation Mobile Networks.
- [28] “Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000,” 1997, Rec. ITU-R M.1225.
- [29] Gary Sullivan, Jens-Rainer Ohm, Woo-Jin Han, and Thomas Wiegand, “Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, pp. 1649–1668, Dec. 2012.
- [30] 3GPP TR 21.905 version 8.8.0 Release 8, “Digital cellular telecommunications system (phase 2+); universal mobile telecommunications system (UMTS); LTE; vocabulary for 3GPP specifications,” 2009.