



Cesar Augusto Sierra Franco

**Desempenho de Serviços de Vídeo sobre
Tecnologia LTE com Utilização de Nós Relay**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. José Roberto Boisson de Marca

Rio de Janeiro
Abril de 2013



Cesar Augusto Sierra Franco

**Desempenho de Serviços de Vídeo sobre
Tecnologia LTE com Utilização de Nós Relay**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Roberto Boisson de Marca

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Guilherme Dutra Gonzaga Jaime

UFRJ

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 02 de Abril de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Cesar Augusto Sierra Franco

Engenheiro em Eletrônica e Telecomunicações graduado pela Universidade do Cauca, Popayán - Colômbia em 2007.

Ficha Catalográfica

Sierra Franco, Cesar Augusto

Desempenho de serviços de vídeo sobre tecnologia LTE com utilização de Nós Relay / Cesar Augusto Sierra Franco; orientador: José Roberto Boisson de Marca. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2013.

84 f.: il. ; 30 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Tese. 2. Sistemas LTE; Nós Relay; Avaliação de desempenho; Vídeo em tempo real; QoS; QoE. I. Boisson de Marca, José Roberto. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

À Deus por esta maravilhosa oportunidade e por ter colocado no meu caminho tudo quanto foi preciso para culminar esta etapa.

À Greis, o amor da minha vida, que fez este sonho possível e sempre esteve ao meu lado em todo momento.

Aos meus pais, que com seu exemplo, apoio e amor tem feito de mim quem sou.

Ao meu irmão, que com suas palavras de animo e admiração motivou-me a seguir em frente nos momentos de dificuldade.

Ao meu orientador, José Roberto Boisson, que apontou o norte deste trabalho, sempre disposto na troca de informação e de oferecer as recomendações oportunas.

À minha família e amigos que sempre estiveram atentos a meus progressos.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Sierra Franco, Cesar Augusto; Boisson de Marca, José Roberto. **Desempenho de Serviços de Vídeo sobre Tecnologia LTE com Utilização de Nós Relay**. Rio de Janeiro, 2013. 84p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A constante evolução e aumento de capacidades multimídia nos dispositivos móveis, prevê um aumento dos serviços baseados em vídeo que apresentam maiores requisitos de taxa de transmissão e restrições nos atrasos. Para enfrentar estes desafios, a tecnologia LTE surge como capaz de atender essa demanda sobre as redes móveis. No entanto, devido à natureza das redes celulares, os terminais que se encontram na borda da célula têm dificuldade para conseguir os níveis de SINR apropriados para aproveitar as taxas oferecidas pelo LTE. Para solucionar este problema, na evolução LTE-Advanced, é considerada a integração de nós de retransmissão (*Relay Nodes*) na arquitetura da rede. Neste trabalho, através de experimentos de simulação, avalia-se o desempenho de aplicações de vídeo em tempo real, focando-se nos usuários da borda da célula. Os resultados obtidos mostram as vantagens do uso de RN em redes LTE e sua contribuição na diminuição de perda de pacotes, aumento da vazão e por conseguinte melhoras na qualidade de vídeo recebido por aqueles usuários.

Palavras-chave

Sistemas LTE; Nós Relay; Avaliação de desempenho; Vídeo em tempo real; QoS; QoE.

Abstract

Sierra Franco, Cesar Augusto;Boisson de Marca, José Roberto (Advisor). **Performance of video services in LTE systems using Relay Nodes**. Rio de Janeiro, 2013. 84p. MSc. Dissertation — Departamento de Engenharia elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The constant evolution and growth of the multimedia applications supported by today's mobile devices leads to an increase on the demand of video based services which impose some new requirements in terms of bitrate and delay. In order to face these challenges, LTE appears as a technology capable of dealing with the video traffic load on mobile networks. However, given the inherent nature of the mobile networks, and in order to take advantage of the bitrates that can be achieved with this technology, the devices located at the cell's edge face some difficulties when a certain SINR must be achieved. To overcome this issue, LTE Advanced comes into the picture as it makes use of Relay Nodes (RN) which were included as part of the network architecture. Based on simulations, the present work evaluates the performance of real time applications on devices located at the cell's edge. The results show the advantage of using Relay Nodes in LTE in aspects such as the reduction of lost packets and the increase of throughput, leading to an improvement of the video quality at the receiver's side.

Keywords

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

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Motivação e objetivo	12
1.2	Trabalhos Relacionados	13
1.3	Contribuição	15
1.4	Esquema da dissertação	15
2	Long Term Evolution	17
2.1	Visão geral	17
2.2	Arquitetura da rede	19
2.2.1	Rede de Acesso: E-UTRAN	19
2.2.2	Núcleo da rede: EPC	20
2.3	Protocolos na interface Rádio	21
2.4	Tecnologias de nível físico	23
2.4.1	Técnicas de acesso baseadas em OFDM	23
2.4.2	Gestão de Recursos	25
2.4.3	MIMO	29
2.5	LTE Advanced	30
3	Relay Nodes	32
3.1	Descrição Geral e casos de uso	32
3.2	Classificação dos Relay Nodes	34
3.2.1	Classificação de acordo com a camada de implementação	34
3.2.2	Classificação pelo uso do espectro	36
3.2.3	Classificação conforme a perspectiva do usuário	37
3.2.4	Classificação adotada pela 3gpp	38
3.3	Arquitetura e protocolos do Sistema	39
3.3.1	Arquitetura geral	39
3.3.2	Protocolos Rádio para RN	40
4	Modelo de Simulação	42
4.1	Ferramentas Utilizadas	42
4.1.1	Hardware	42
4.1.2	Sistema Operacional	42
4.1.3	Simulador de Rede: LTE-Sim	43
4.1.4	Ferramenta Evalvid	46
4.2	Desenvolvimentos realizados	47
4.2.1	Implementação dos <i>Relay Nodes</i>	47
4.2.2	Integração LTE-Sim / Evalvid	48
4.2.3	Limitação do Modelo implementado	50
4.3	Cenários de Simulação	51
4.3.1	Cenários e experimentos implementados	51
4.3.2	Parâmetros da simulação do E-UTRAN	53
4.3.3	Modelo do Tráfego	55
4.4	Métricas Avaliadas	56

4.4.1	Métricas de Qualidade de Serviço	56
4.4.2	Métricas de Qualidade de Experiência	57
4.5	Processo de simulação e de avaliação de Resultados	58
4.5.1	Fase 1	58
4.5.2	Fase 2	59
4.5.3	Fase 3	59
5	Resultados da Simulação	61
5.1	Análise das Métricas de QoS	61
5.1.1	Experimento 1	61
5.1.2	Experimento 2	63
5.1.3	Experimento 3	65
5.1.4	Experimento 4	67
5.1.5	Experimento 5	69
5.2	Análise das Métricas de QoE	71
5.2.1	Experimento 1	71
5.2.2	Experimento 3	73
5.2.3	Experimento 5	74
5.3	Observações finais	76
6	Conclusão	78
6.1	Trabalhos Futuros	79
7	Referências Bibliográficas	81

Lista de figuras

2.1	Evolução das tecnologias 3GPP	17
2.2	Características chave da interface rádio LTE	18
2.3	Arquitetura geral do sistema LTE	19
2.4	Rede de acesso E-UTRAN	20
2.5	Arquitetura geral do núcleo da Rede EPC	21
2.6	Protocolos da interface rádio do E-UTRAN	22
2.7	Exemplo do espectro correspondente a seis subportadoras OFDM	24
2.8	Multiplexação de usuários em OFDMA	25
2.9	Diagrama de blocos do DFT-s-OFDM	26
2.10	Slot Tempo-Frequência em LTE	27
2.11	Diversidade Multiusuário e seu possível aproveitamento mediante o agendamento de pacotes	27
2.12	Ilustração do agendamento de pacotes em OFDMA	28
2.13	Ilustração da adaptação do enlace em OFDMA	29
2.14	Configuração de um sistema sem fio MIMO	30
3.1	Enlaces AL e BL	33
3.2	Casos de uso típicos dos RN	34
3.3	RN com funcionamento na camada 1	35
3.4	RN com funcionamento na camada 2	35
3.5	RN com funcionamento na camada 3	36
3.6	Interferência entre os enlaces AL e BL	36
3.7	Modos de funcionamento dos RN (a) in-band, (b) out-band	37
3.8	tipos de RN desde a perspectiva do usuário	38
3.9	Arquitetura geral de uma rede LTE-A com implementação de RN	40
3.10	Protocolos Rádio, planos de a) controle e b) usuário	41
4.1	Protocolos implementados em LTE-Sim	44
4.2	Exemplo de saída produzida por LTE-Sim	45
4.3	Esquema de avaliação utilizado pelo Evalvid	46
4.4	Fases do desenvolvimento do RN	48
4.5	Esquema do RN desenvolvido	49
4.6	Interface desenvolvida para integrar Evalvid e LTE-Sim	49
4.7	Processamento de pacotes e funcionalidade de tunelamento na tecnologia LTE-Advanced	50
4.8	Experimento 1 - Usuário em diferentes lugares da célula	52
4.9	Experimento 3 - células com diferentes raios	53
4.10	Experimento 4 - Vários RN na célula	55
4.11	Processo detalhado de simulação e avaliação de métricas	60
5.1	Perda de pacotes no experimento 1	62
5.2	Vazão obtida no experimento 1.	63
5.3	Atraso médio na entrega de pacotes no experimento 1	63
5.4	Métricas obtidas para o enlace de acesso no experimento 2	64
5.5	Perda de pacotes no experimento 2	65

5.6	vazão obtida no experimento 2	65
5.7	Atraso médio na entrega de pacotes no experimento 2	66
5.8	Perda de pacotes do experimento 3	66
5.9	Vazão do experimento 3	67
5.10	Atraso médio na entrega de pacotes no experimento 3	67
5.11	Perda de pacotes no experimento 4	68
5.12	Vazão no experimento 4	68
5.13	Atraso médio na entrega de pacotes no experimento 4	69
5.14	Atraso médio na entrega de pacotes no experimento 5	69
5.15	Perda de pacotes no experimento 5	70
5.16	vazão obtida pelo usuário próximo da borda da célula no experimento 5	70
5.17	PSNR média e MOS equivalente para o experimento 1	72
5.18	Valores de MOS para diferentes distâncias do UE da eNB no experimento 1	73
5.19	PSNR média e MOS equivalente para o experimento 3	73
5.20	Valores de MOS para diferentes tamanhos de célula no experimento 3	74
5.21	PSNR média e MOS equivalente para o experimento 5	75
5.22	Valores de MOS obtidos pelo UE da borda da célula sem o uso do RN no experimento 5	75
5.23	Valores de MOS obtidos pelo UE da borda da célula com o uso do RN no experimento 5	76
5.24	Imagens significativas do vídeo recebido pelos usuários a diferentes distâncias da eNB	77

Lista de tabelas

4.1	Parâmetros utilizados no experimento 1	52
4.2	Parâmetros utilizados no experimento 2	53
4.3	Parâmetros utilizados no experimento 3	54
4.4	Parâmetros utilizados no experimento 4	54
4.5	Parâmetros utilizados no experimento 5	54
4.6	Parâmetros de simulação do E-UTRAN	55
4.7	Escala de qualidade MOS	58
5.1	Mapeamento do PSNR para o MOS	71

1

Introdução

Neste capítulo se apresenta a motivação e os objetivos deste trabalho. Posteriormente é feito um resumo dos trabalhos relacionados e finalmente é apresentado um roteiro para a dissertação.

1.1

Motivação e objetivo

A evolução dos serviços de telecomunicações tem sido um dos fatores chave da motivação para o constante desenvolvimento de novas tecnologias de comunicações móveis. Desde uma primeira fase baseada em serviços de voz, passando pela atual, onde o tráfego de dados é dominante, com a aparição de novos dispositivos móveis (smartphones e tablets) com altas capacidades de processamento e telas adequadas para a reprodução de conteúdos multimídia, se prevê uma próxima geração onde dominarão os serviços baseados em vídeo. Esta afirmação advém de várias análises, entre elas aquela feita pela CISCO [1], a qual afirma que mais da metade do tráfego móvel em 2011 foi proveniente de serviços de vídeo, correspondendo a 52% da totalidade da informação trafegada pelas redes sem fio. Além disso é estimado um crescimento de 25 vezes do tráfego de vídeo até 2016, quando deverá representar 70% do total de tráfego de dados móvel mundial.

O desenvolvimento de tecnologias como a IEEE 802.16/Wimax [2] e 3GPP Long Term Evolution (LTE) [3], responde aos desafios apontados por aquela tendência (aumento de tráfego e mobilidade), oferecendo uma maior vazão por usuário, maiores capacidades e menores latências na interface aérea, conseguindo assim oferecer conteúdos multimídia em tempo real e possibilitando a integração de múltiplos serviços [4].

Focando a atenção na evolução das tecnologias propostas pelo grupo 3GPP, principalmente nas técnicas LTE e LTE-Advanced, como as tecnologias emergentes na área de redes celulares, é importante conhecer tanto as possibilidades como as limitações destas técnicas para a transmissão de vídeo com a finalidade de prevenir eventos de saturação, de desenvolver mecanismos de otimização da capacidade, de garantir a qualidade na comunicação e a permitir

a redução dos custos de implementação. Um mecanismo definido no processo de padronização de LTE-Advanced é o *Relaying* [5], o qual tem a finalidade de melhorar a cobertura e aumentar a vazão para os usuários da borda da célula, melhorando assim a capacidade do sistema em geral.

O objetivo deste trabalho é avaliar mediante experimentos de simulação, o desempenho de serviços de vídeo sobre redes LTE, analisando as capacidades, restrições e limitações do sistema, assim como também avaliando as melhoras introduzidas pela implementação das técnicas de *relaying*, focando a atenção no usuário próximo da borda da célula. Serão empregadas métricas apropriadas para a avaliação da qualidade experimentada por usuários (*QoE - Quality of Experience*) de serviços de vídeo, tais como a PSNR (*Peak Signal to Noise Ratio*), a MOS (*Mean Opinion Score*) [6], além de medidas de desempenho mais comuns para mensurar a qualidade de serviço (*QoS - Quality of service*) da rede como, por exemplo, atraso, vazão e perda de pacotes.

1.2

Trabalhos Relacionados

O aumento da popularidade de aplicações de vídeo em dispositivos móveis produzirá um aumento significativo de tráfego com altas taxas de transmissão e restrições de atraso e perdas de pacotes mais exigentes, trazendo consigo novos desafios para as tecnologias móveis emergentes. Esta situação tem atraído o interesse da indústria e da comunidade acadêmica, gerando varias pesquisas nesta área.

Oyman e colaboradores [7], ressaltam a importância de conhecer as potencialidades e limitações das novas tecnologias sem fio para a transmissão de vídeo com a finalidade de evitar eventos de saturação. Neste trabalho foi usado um método analítico para determinar o número máximo de usuários que podem ser atendidos (modos *multicast* e *unicast*) pelas técnicas Wimax e 3GPP, conforme as taxas máximas de transmissão teóricas que podem ser atribuídas a um usuário móvel, assumindo condições de transmissão livre de erros.

Seguindo o mesmo objetivo, em [8], Talukdar e colaboradores realizaram simulações a nível do sistema para determinar a capacidade do enlace descendente da interface ar LTE para serviços de vídeo streaming de tipo *unicast*. Neste trabalho os autores utilizaram arquivos de rastreamento de vídeo codificados em H.264/AVC, mostrando que para um sistema LTE de 10 Mhz com MIMO 2x2, em um ambiente de baixa mobilidade é possível prover simultaneamente até 62, 40, 19 e 5 usuários para taxas de vídeo de 128, 256, 512 kbps e 1 Mbps respectivamente. Estes mesmos autores, num trabalho poste-

rior [9], realizaram uma avaliação similar, investigando os benefícios do uso de técnicas MIMO usando quatro antenas de transmissão. Nos resultados da simulação, eles indicam que, usando 4×2 *closed-loop SU-MIMO* as capacidades na transmissão de vídeo podem ser melhoradas em aproximadamente 40% (num cenário de baixa mobilidade) em comparação com o esquema 2×2 *closed-loop SU-MIMO*.

Por sua parte, McDonagh e colaboradores [10] investigaram o uso da codificação de vídeo escalável (H.264/SVC) para entrega de vídeo através de uma rede LTE. Particularmente, avaliaram mediante experimentos de simulação (OPNET) e métricas associadas a qualidade da experiência, como a perda de pacotes influencia a qualidade do vídeo recebido para diferentes tipos de escalabilidade (espacial, de qualidade e temporal). Os resultados mostram que o parâmetro que tem maior influência na qualidade do vídeo é a escalabilidade espacial (resolução). Adicionalmente, os autores demonstraram que modificando apenas a escalabilidade do vídeo, não é possível evitar a degradação da qualidade.

Pande e colaboradores, no seu trabalho [11] realizam uma avaliação do desempenho de tráfego de vídeo mediante simulações em Matlab (Simulink), variando parâmetros da camada física (esquemas de modulação e codificação) para diferentes estados do canal. Eles analisaram os resultados através de métricas associadas à qualidade da experiência, explorando a possibilidade de implementar estratégias de adaptação de enlace mediante o uso de esquemas de modulação e codificação adaptativos baseados em métricas de QoE em lugar de utilizar o indicador de qualidade do canal (CQI).

Wang e colaboradores [12], investigaram o desempenho de aplicações de vídeo chamada sobre um enlace descendente LTE sem e com o fornecimento de estratégias de QoS comparando os resultados alcançados pelas estratégias de alocação de recursos *Proportional Fair (PF)* e *Proportional Fair scheduler with minimum/maximum rate constraints (PFMR)*. Os autores mostraram nos seus resultados que mediante o uso de PFMR (com QoS) pode-se obter maior capacidade para o transporte de vídeo que com PF (sem QoS). No entanto, com PFMR, para os usuários da borda da célula e para aqueles com tráfego *Best Effort* a vazão se reduz significativamente.

Os trabalhos mencionados anteriormente exploram vários aspectos relevantes de pesquisa sobre o uso de aplicações de vídeo sobre redes LTE, porém, no melhor do nosso conhecimento, até o momento da redação desta dissertação não foram encontrados estudos que avaliem o desempenho de vídeo com a utilização de *Relay Nodes (RN)* quando está tecnologia de rádio é empregada.

Já na área dos RNs, dado que estes são um dos fatores chave em LTE-A,

diversos estudos ([5], [13], [14], entre outros) têm sido realizados, com foco em determinar a melhoria fornecida por esta tecnologia no aumento da capacidade e cobertura da célula, e também apresentando análises do número de RN e posições ótimas bem como o desenvolvimento de esquemas de alocação de recursos.

1.3

Contribuição

Este trabalho analisa o desempenho de aplicações de vídeo mediante métricas de qualidade de serviço e de experiência para uma rede LTE com a utilização de *Relay Nodes*, focando-se principalmente no desempenho do usuário na borda da célula.

No desenvolvimento desta pesquisa, não foram encontradas ferramentas de acesso público que permitam simular o uso de RNs em tecnologia LTE. Conseqüentemente, baseando-se no simulador de código aberto “LTE-Sim” [15] e conforme as recomendações definidas no padrão da 3GPP [16] [17], foram modeladas e desenvolvidas classes que emularam o funcionamento dos RN, possibilitando a integração destes nós nos cenários de simulação.

Adicionalmente, foi desenvolvida uma interface entre as ferramentas “Evalvid” [18] e “LTE-Sim” que permitiu emular tráfego de vídeo H.264/AVC em tempo real e avaliar seu desempenho mediante métricas associadas a qualidade da experiência.

Os módulos mencionados acima, fornecem uma ferramenta de código aberto que pode contribuir no desenvolvimento de futuras pesquisas nesta (vídeo/LTE/RN).

1.4

Esquema da dissertação

Esta dissertação apresenta no capítulo 2 uma visão geral do padrão LTE e algumas informações chave sobre esta tecnologia.

Ao longo do capítulo 3 são apresentadas as características, elementos, classificações, modos de funcionamento e protocolos definidos pela 3gpp para a utilização de *Relay Nodes* em LTE-A.

No capítulo 4 são descritas tanto as ferramentas utilizadas quanto os desenvolvimentos realizados que permitiram a simulação e avaliação de aplicações de vídeo sobre redes LTE com a utilização de RN. Ainda no capítulo 4, são apresentados os experimentos e cenários implementados, detalhando os parâmetros utilizados para a simulação.

No capítulo 5 são apresentados os resultados das simulações, e as avaliações correspondentes das métricas de QoS e QoE.

Finalmente ao longo do capítulo 6 se apresentam as conclusões obtidas durante a realização desta dissertação.

2 Long Term Evolution

Neste capítulo se apresenta de forma resumida as principais características das tecnologias LTE e LTE-Advanced. Inicialmente se apresenta uma visão geral da tecnologia seguido da descrição da arquitetura de rede, os protocolos utilizados na interface rádio e as tecnologias de nível físico. Finalmente se apresentam os aspectos chave utilizados em LTE-Advanced para cumprir com os requisitos definidos pela União Internacional de Telecomunicações (ITU) [19].

2.1 Visão geral

LTE é uma tecnologia de rádio que faz parte do caminho evolutivo GSM para as comunicações móveis em banda larga proposto pelo 3GPP (Figura 2.1). Esta tecnologia permite atingir valores de eficiência espectral e vazão maiores do que os conseguidos pelo protocolo *High Speed Packet Access* (HSPA), com a finalidade de suportar a demanda de novos serviços moveis com altos requerimentos [20] de taxa de bit, retardos e capacidade do sistema.

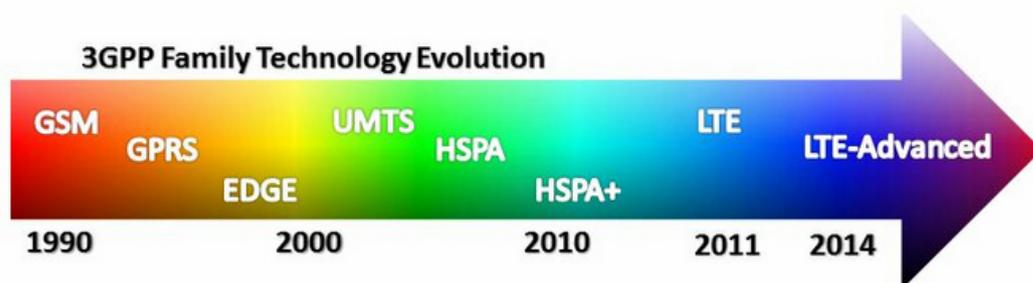


Figura 2.1: Evolução das tecnologias 3GPP [21]

A padronização de LTE por parte da 3GPP começa a partir da versão 8 que foi aprovada em dezembro do ano de 2007, na qual se identificam uma serie de requisitos de alto nível, como o custo per bit reduzido, melhoras na

provisão de serviços, flexibilidade no uso das bandas de frequência e consumos de potência razoáveis nos terminais.

Na figura 2.2 se ilustram as características chave introduzidas no LTE [22] em sua interface rádio, explicadas brevemente a seguir:

O uso de OFDM/OFDMA como técnica de acesso, permite a utilização de larguras de banda flexíveis entre 1.4 e 20 Mhz (até 100 Mhz em LTE-A), além de combater eficientemente os efeitos produzidos pela propagação multi-percurso entre eles a interferência inter-simbólica.

O uso de Modulações e codificações adaptativas de acordo ao estado de canal experimentado pelo usuário (em termos da razão sinal-interferência) permite melhorar a vazão do sistema ao utilizar modulações/codificações com diferentes eficiências espectrais.

A arquitetura de rede totalmente baseada no Protocolo de Internet (IP) e o uso de técnicas de agendamento de pacotes (*packet scheduling*) melhoram o aproveitamento dos recursos rádio ao permitir alocar os recursos conforme as necessidades dos serviços e estados do canal de cada usuário.

O uso de técnicas multi-antena (MIMO) consiste no uso de estruturas de transmissão/recepção que utilizam diversas antenas acompanhadas de técnicas de processamento de sinais. Estas técnicas permitem melhorar o desempenho do sistema aumentando a capacidade das células, melhorando a cobertura e a velocidade de transmissão por usuário.

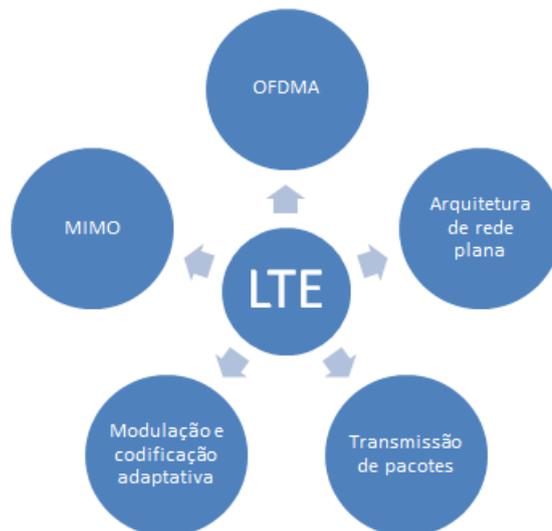


Figura 2.2: Características chave da interface rádio LTE

2.2

Arquitetura da rede

As arquiteturas de rede utilizadas pela família de sistemas especificados pela 3GPP, se adaptam à arquitetura genérica dos sistemas celulares, identificando três componentes principais: o equipamento do usuário, que é o dispositivo que permite ao usuário acessar aos serviços da rede, o núcleo da rede, que é a parte do sistema encarregada de funções como o controle de acesso, gestão da mobilidade e interconexão com outras redes, e finalmente a rede de acesso, que sustenta a transmissão rádio e proporciona conectividade entre os usuários e o núcleo da rede. Na figura 2.3, se ilustra de forma simplificada a arquitetura geral de rede para a tecnologia LTE (esta arquitetura é denominada formalmente nas especificações como *Evolved Packet System (EPS)* e os componentes fundamentais são: a nova rede de acesso *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)*, e o novo domínio de pacotes do núcleo da rede, *Evolved Packet Core (EPC)*.

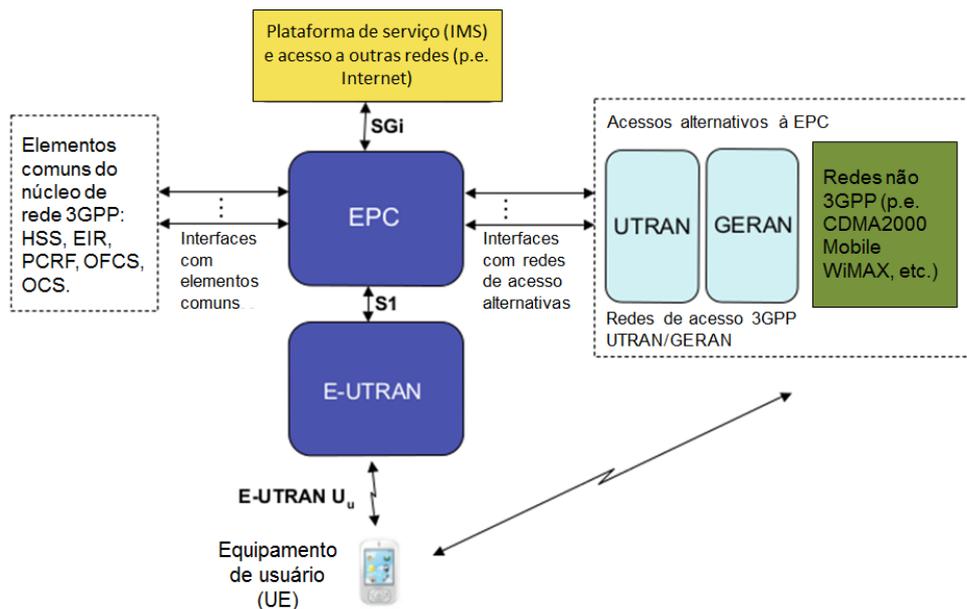


Figura 2.3: Arquitetura geral do sistema LTE

2.2.1

Rede de Acesso: E-UTRAN

A arquitetura da rede de acesso está composta unicamente de uma entidade de rede chamada *evolved NodeB (eNB)* que representa a estação rádio-base do E-UTRAN. Desta forma, o eNB integra todas as funcionalidades da rede de acesso fornecendo conectividade entre os equipamentos de usuário (UE) e o núcleo da rede (EPC).

Como se observa na figura 2.4 os eNBs se comunicam com o resto de elementos do sistema através de três interfaces:

- **Uu**: interface que permite a transferência de informação pelo canal rádio entre o eNB e os UE.
- **S1**: interface que liga o eNB ao núcleo da rede EPC. Esta interface se divide em duas interfaces: a **S1-MME** para suportar o plano de controle e a **S1-U** para suportar o plano de usuário.
- **X2**: permite a ligação entre dois eNB para o intercâmbio de mensagens de sinalização ou tráfego de usuário durante o processo de handover.

A descrição detalhada da arquitetura do E-UTRAN pode-se encontrar nos documentos da 3GPP, TS 36.300 [23] e TS 36.401 [24].

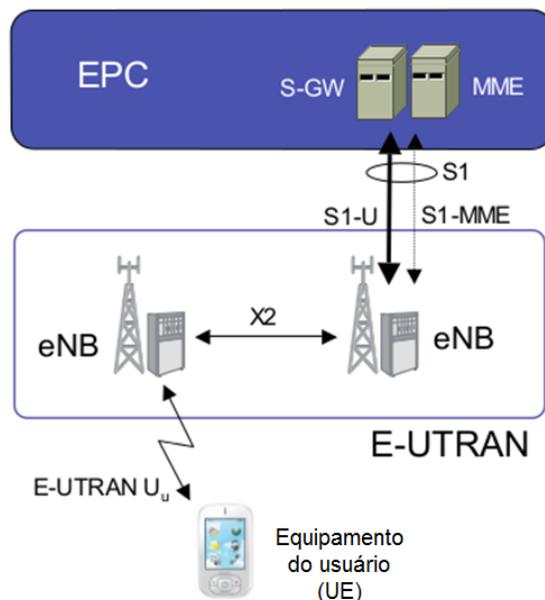


Figura 2.4: Rede de acesso E-UTRAN

2.2.2

Núcleo da rede: EPC

O EPC foi concebido principalmente para fornecer conectividade IP mediante uma arquitetura otimizada que aproveita as novas capacidades que oferece a rede de acesso E-UTRAN, com a possibilidade de acessar a seus serviços através de outras redes de acesso tanto 3GPP (UTRAN e GERAN) quanto fora do âmbito 3GPP (cdma2000, Wimax, 802.11). Na figura 2.5, ilustram-se

as principais entidades da arquitetura do EPC: *Mobility Management Entity (MME)*, *Serving Gateway (S-GW)* e o *Packet Data Network Gateway (P-GW)*.

A descrição detalhada da arquitetura do EPC, pode-se encontrar nos documentos 3GPP TS 23.401 [25] (para redes de acesso 3GPP: E-UTRAN, UTRAN e GERAN) e 3GPP TS 23.402 [26] (Para utilização em redes de acesso não 3GPP).

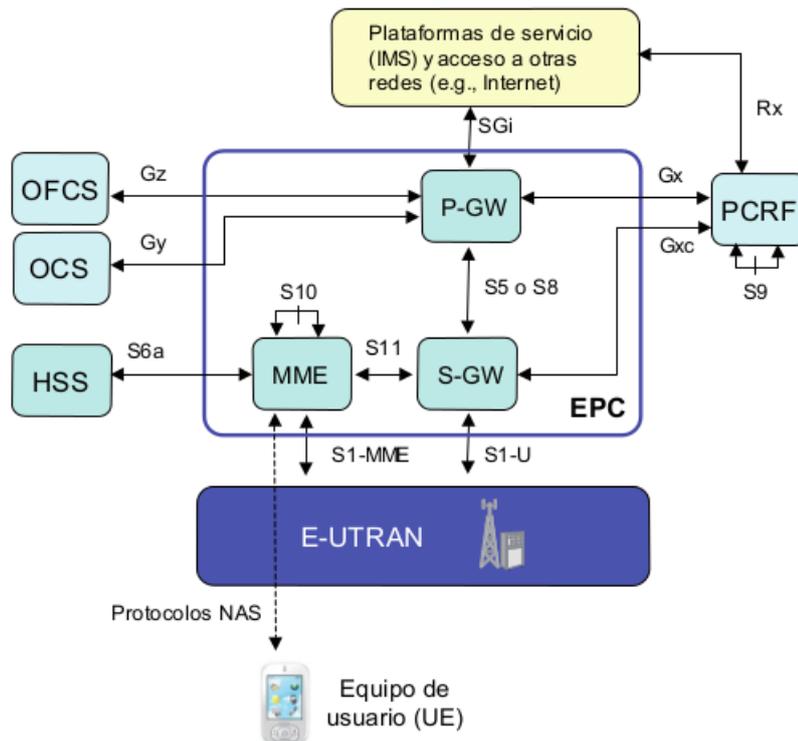


Figura 2.5: Arquitetura geral do núcleo da Rede EPC

2.3

Protocolos na interface Rádio

O envio de pacotes IP entre o eNB e um UE através da interface rádio faz uso de um conjunto de protocolos formados por uma camada de enlace (camada 2) e uma camada física (camada 1), tal como se mostra na figura 2.6. A camada de enlace encontra-se dividida em três subcamadas: *Packet Data Convergence Protocol (PDPC)* [27], *Radio Link Control (RLC)* [28] e *Medium Access Control (MAC)* [29]. A continuação são descritas as principais características dessas camadas e subcamadas.

- ***Packet Data Convergence Protocol (PDPC)***. Esta é a camada superior da pilha de protocolos, sendo a responsável de fornecer o ponto

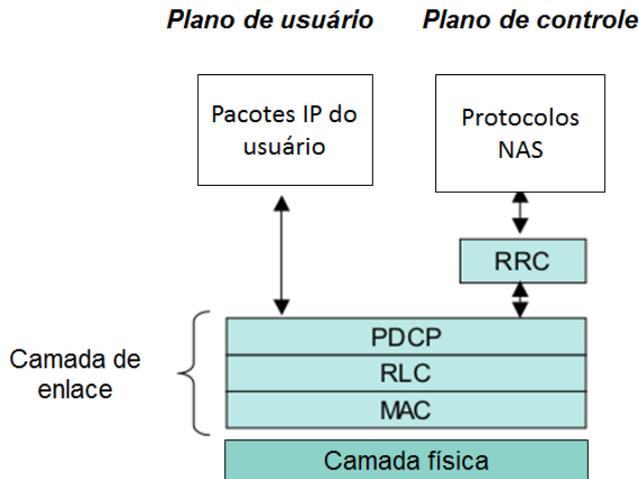


Figura 2.6: Protocolos da interface rádio do E-UTRAN

de acesso ao serviço portador rádio (*Radio Bearer, BR*), recebendo e entregando os pacotes IP do tráfego do usuário. As funções principais desta camada são a compressão dos cabeçalhos dos pacotes IP e a cifragem da informação. O cabeçalho adicionado por esta camada (PDPC) contém um número de sequência que identifica o pacote IP enviado e permite realizar uma entrega ordenada dos pacotes IP ao receptor.

- **Radio Link Control (RLC).** A camada RLC permite enviar de forma confiável os pacotes PDPC entre o eNB e o UE. Para isto, esta camada implementa funções de correção de erro mediante mecanismos ARQ (*Automatic Repeat Request*), concatenação, segmentação e re-montagem, detecção de duplicações e entrega ordenada dos pacotes PDPC para as camadas superiores.
- **Medium Access Control (MAC).** Esta camada é a responsável por controlar o acesso ao canal rádio. Para isto, a camada MAC oferece funções de agendamento (*Scheduling*) dinâmico de recursos entre UE conforme a prioridades estabelecidas. Nesta camada os pacotes RLC de diferentes serviços de transporte rádio (de um ou diferentes usuários) são multiplexados nos canais oferecidos pela camada física.
- **Camada física (PHY).** Esta camada realiza a transmissão através do canal rádio. Implementa as funções de codificação de canal, modulação, processamento associado às técnicas de múltiplas antenas de transmissão/recepção (MIMO), e mapeamento do sinal aos recursos físicos frequência-tempo apropriados. No enlace ascendente, a camada física se baseia no esquema de transmissão *FDMA* com portadora simples (*SC-*

FDMA, Single Carrier FDMA) e no enlace descendente no esquema de transmissão/múltiplo acesso OFDMA.

O plano de controle entre o UE e a rede, faz uso da mesma camada de enlace (protocolos PDPC, RLC e MAC) e camada física utilizadas pelo plano de usuário. Já camada de rede, emprega os seguintes sub-camadas e protocolos:

- **Radio Resource Control (RRC)**. Esta sub-camada permite estabelecer uma ligação de controle entre o eNB e um UE através da qual se realizam funções relacionadas com a gestão da interface rádio.
- **Non-Access-Stratum Protocol (NAS)**. Os protocolos NAS tem funções de autenticação, autorização, gestão de mobilidade dos terminais que não tem conexão RRC estabelecida e gestão dos serviços portadores da rede EPS. As mensagens destes protocolos são transportadas de forma transparente na interface rádio, sendo encapsuladas dentro de mensagens RRC.

2.4

Tecnologias de nível físico

Nesta seção se apresentam algumas das tecnologias de nível físico empregadas, que permitem a LTE conseguir maiores níveis de capacidade e eficiência no uso dos recursos rádio em relação aos sistemas predecessores de comunicações móveis.

2.4.1

Técnicas de acesso baseadas em OFDM

A técnica de transmissão OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*) é um mecanismo de transmissão multi-portadora que multiplexa um conjunto de símbolos sobre um conjunto de sub-portadoras ortogonais (figura 2.7), permitindo efetuar a transmissão simultânea de todos os símbolos, conservando a capacidade de separação dos mesmos na recepção. Esta técnica traz benefícios tais como: alta eficiência espectral, robustez contra interferência de rádio frequência (RF) e baixa distorção por propagação multi-percurso.

Esta técnica é a base para os esquemas de acesso múltiplo utilizados por LTE que serão explicadas brevemente a seguir:

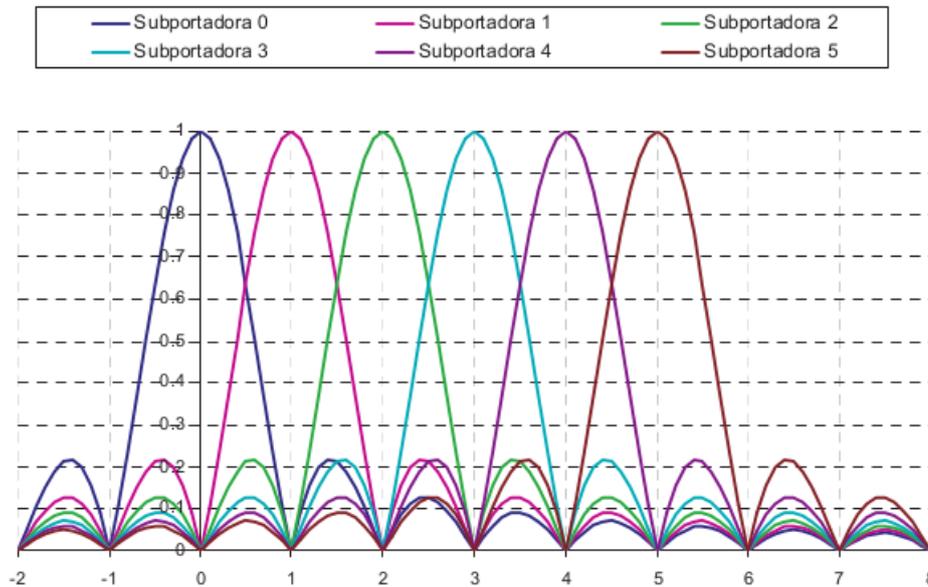


Figura 2.7: Exemplo do espectro correspondente a seis subportadoras OFDM

OFDMA, técnica de acesso múltiplo para o enlace descendente

A técnica de acesso múltiplo OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) utilizada no enlace descendente de LTE permite que os diferentes símbolos modulados sobre as subportadoras pertençam a usuários diferentes. Desta forma, como ilustra a figura 2.8, é possível ter várias transmissões simultâneas correspondentes a diferentes fluxos de informação em sub-portadoras diferentes. Pode-se observar que nesta figura existem U fluxos de informação correspondentes a diferentes usuários, sendo N_k o número de símbolos enviados para o usuário k -ésimo, onde $d_{i,k}$ representa o i -ésimo símbolo do k -ésimo usuário. Da mesma forma, o receptor de cada usuário unicamente precisa recuperar o conteúdo das sub-portadoras designadas ao dito usuário para separar a informação destinada para ele (Note-se que será preciso ter mecanismos de sinalização apropriados para notificar a cada usuário através de quais sub-portadoras está sendo enviada a informação).

Entre algumas das vantagens do uso do OFDMA como técnica de acesso se encontram: a diversidade multiusuário e frequencial, robustez frente à propagação multi-percurso, flexibilidade na designação de banda, elevada granularidade nos recursos designáveis, entre outras.

SC-FDMA técnica de acesso múltiplo para o enlace ascendente

O esquema de transmissão utilizado no enlace ascendente de LTE em FDD e TDD é SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*)

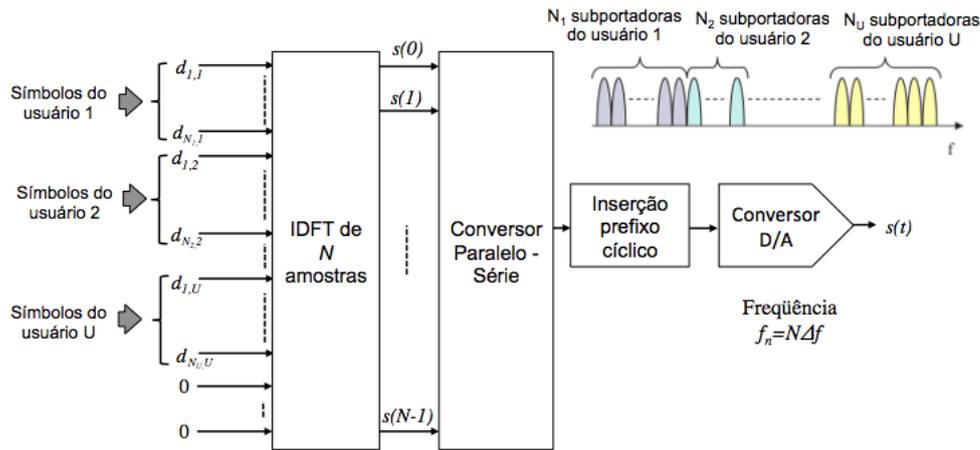


Figura 2.8: Multiplexação de usuários em OFDMA

com prefixo cíclico.

A utilização desta técnica tem como objetivo minimizar a complexidade (com relação a o OFDMA) conseguindo uma maior eficiência nos amplificadores de potencia e menores custos nos terminais de usuário.

A figura 2.9 apresenta o funcionamento do modo conhecido como *Discret Fourier Transform - spread - OFDM (DTF-s-OFDM)*, que foi escolhido para a geração das sinais SC-FDMA em LTE. Inicialmente o fluxo de dados é convertido de serial para paralelo. Cada bit é modulado e transformado do domínio do tempo para o domínio da frequência através da Transformada Rápida de Fourier (FFT) e o resultado é mapeado nas subportadoras disponíveis. Após o sinal ser submetido a Transformada Inversa de Fourier (IFFT), é adicionado o prefixo cíclico, que é utilizado como um tempo de guarda entre os símbolos. Ao final do processo o sinal é convertido novamente de paralelo para serial [30].

2.4.2

Gestão de Recursos

Com a finalidade de obter um uso eficiente dos recursos rádio disponíveis, tais como frequências e *slots* de tempo, precisa-se ter um conjunto de mecanismos de gestão para decidir como os ditos recursos são distribuídos entre os diferentes usuários e os respectivos serviços associados conforme seus requisitos de qualidade de serviço.

A seguir são descritos os mecanismos relacionados com as características da técnica de acesso múltiplo OFDMA.

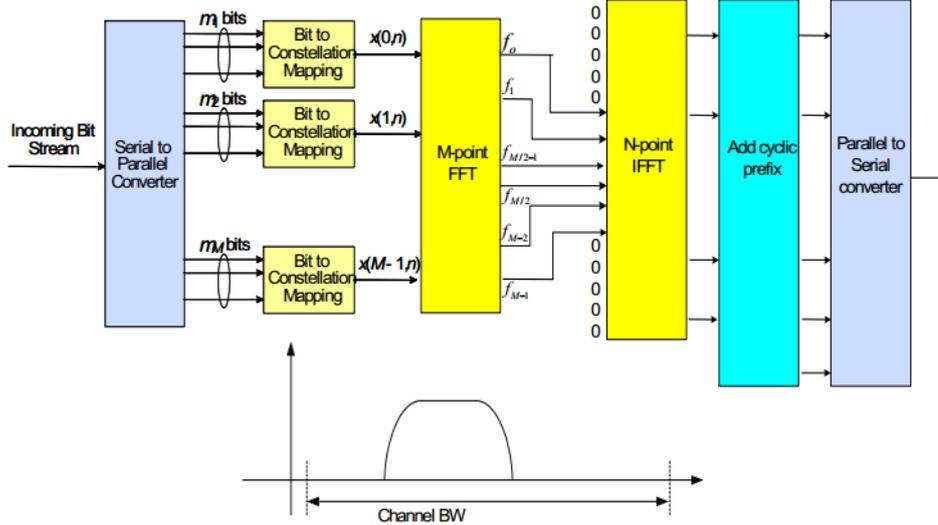


Figura 2.9: Diagrama de blocos do DFT-s-OFDM [30]

Agendamento de Pacotes

O agendamento de pacotes em LTE consiste em designar dinamicamente os recursos rádio aos usuários para que estes consigam realizar suas transmissões ordenadamente através da interface rádio LTE. O agendamento envolve várias sub-tarefas tais como, decidir que usuários vão transmitir, em quais recursos da interface de rádio, e com qual formato de modulação e codificação. Para isto, o agendamento de pacotes considera os requisitos de qualidade de serviço associados aos serviços de transporte rádio, a qualidade do canal para cada terminal, o estado dos *Buffers*, etc.

O agendamento de pacotes, está relacionado diretamente com as características da interface rádio LTE, a qual define um slot tempo-frequência de recursos rádio (figura 2.10), onde o mínimo recurso que pode ser alocado a um usuário é um bloco de 180 KHz num sub-quadro de 1 ms, chamado de *Physical Resource Block* (PRB). Esta alta granularidade da interface LTE permite que o agendador consiga reagir às rápidas variações do canal rádio.

No domínio do tempo é possível tirar vantagem de um efeito conhecido como *diversidade multi-usuário*, o qual devido à existência de vários usuários, é mais provável que algum deles experimente uma boa qualidade de canal num determinado sub-quadro, assim, o agendador pode alocar os recursos ao usuário com melhor qualidade de canal.

Além do domínio temporal, LTE permite estender este conceito para o domínio da frequência (figura 2.11), levando em conta as variações do canal devidas aos desvanecimentos seletivos em frequência. A figura 2.11 mostra um exemplo de canal para dois usuários. Pode-se observar que o canal é percebido de forma diferente tanto em frequência quanto no tempo por cada usuário, e

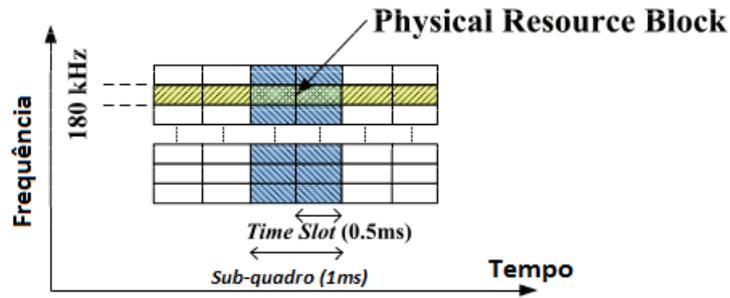


Figura 2.10: Slot Tempo-Frequência em LTE

mediante o uso da técnica de agendamento é possível utilizar eficientemente os recursos rádio.

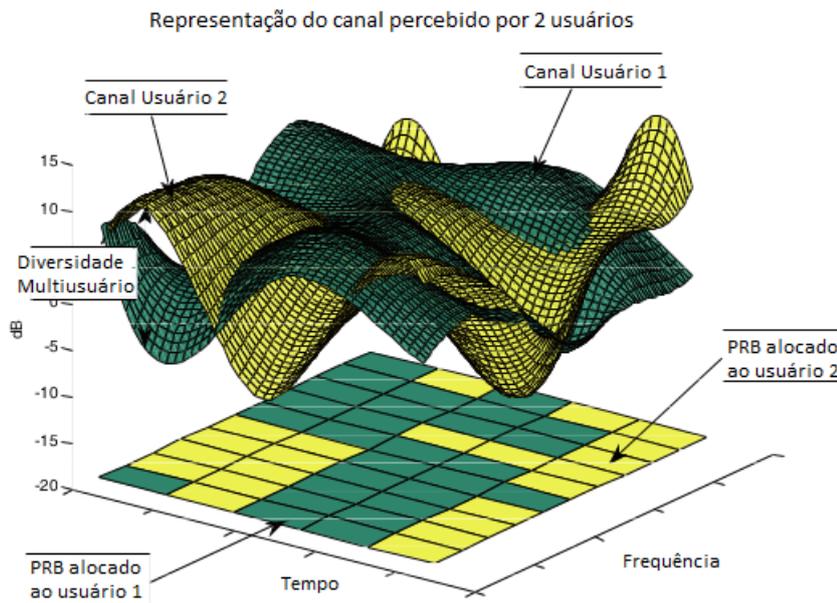


Figura 2.11: Diversidade Multiusuário e seu possível aproveitamento mediante o agendamento de pacotes

Em LTE, a função de agendamento se encontra no eNB (tanto para o enlace descendente quanto para o enlace ascendente), na camada MAC. Seu funcionamento requer sinalização entre os usuários e a eNB para prover informações do estado de canal, do estado das filas e situação dos recursos alocados. Na figura se ilustra graficamente o processo de agendamento de pacotes.

O mecanismo de agendamento de pacotes pode variar seu princípio de funcionamento e tomar decisões conforme à estratégia utilizada. A seguir são enumeradas algumas das principais estratégias típicas:

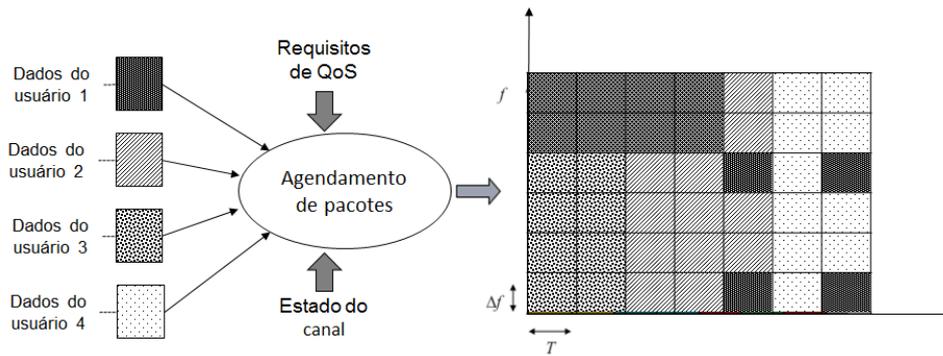


Figura 2.12: Ilustração do agendamento de pacotes em OFDMA

- **Maximum Rate (MR):** Esta estratégia seleciona ao usuário que experimenta em cada sub-quadro, as melhores condições de canal rádio em um PRB dado. MR maximiza a capacidade do canal rádio, no entanto, não é justo dado que num cenário com usuários que experimentem qualidade de canal muito superior ao resto, ganhariam quase sempre o canal, impedindo ao resto de usuários transmitir.
- **Round Robin (RB):** Esta estratégia aloca ciclicamente os recursos aos usuários sem considerar as condições do canal ou a quantidade de dados transmitidos. Por tanto, é uma estratégia justa no sentido em que cada usuário tem designado o canal durante o mesmo tempo, porém, ao não considerar as condições do canal, não está adaptado às necessidades dos usuários.
- **Proportional Fair (PF):** Esta estratégia procura atender a relação entre maximizar a vazão de dados do sistema e permitir um nível mínimo de serviço para todos os usuários. Isso geralmente é realizado por meio da adição de alguma forma de priorização inversamente proporcional à quantidade de recursos de rádio estimada para um usuário dado.

Adaptação de enlace

A estratégia de adaptação de enlace (*link adaptation*) tenta obter o máximo rendimento do canal (em função da velocidade de transmissão) mediante a seleção da modulação/codificação que permita enviar o maior número de bits por símbolo conforme as condições instantâneas de SNR. Desta forma, aquelas sub-portadoras que apresentem uma melhor razão sinal ruído, vão conseguir utilizar modulações com maior eficiência espectral (p.e. QAM-64) que aquelas que apresentem uma razão sinal ruído menor.

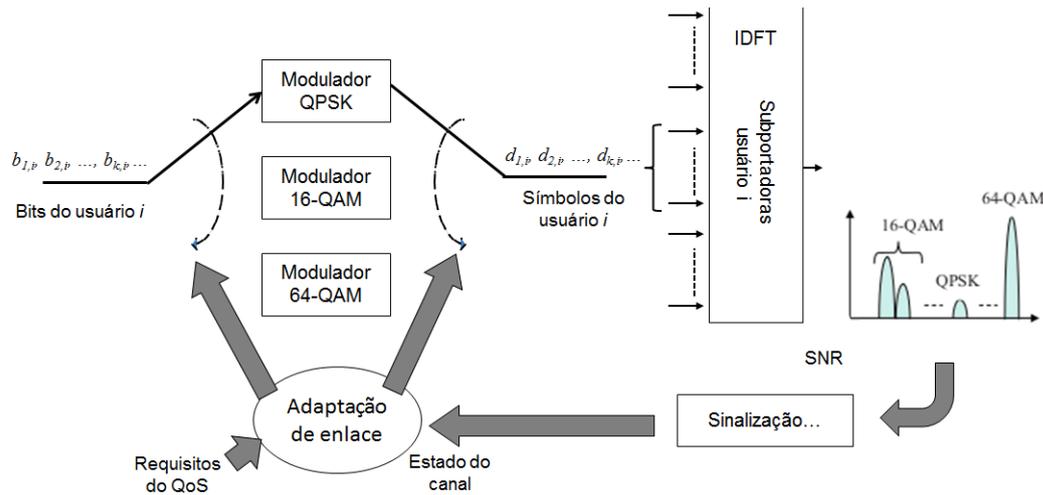


Figura 2.13: Ilustração da adaptação do enlace em OFDMA

Este processo ilustra-se graficamente mediante um exemplo na figura 2.13.

Neste caso, existem três modulações disponíveis, QPSK, 16-QAM e 64-QAM. A seleção da modulação é feita previamente ao processo da Transformada Inversa discreta de Fourier (IDFT) em função da SNR medida para as sub-portadoras de cada usuário. A decisão depende dos requisitos de QoS e do estado do canal (SNR) de cada usuário, que deve ser informado através de mecanismos de sinalização no enlace ascendente. Como resultado se observa que o sinal com maior SNR seleciona a modulação 64-QAM enquanto que aquela com menor SNR utilizaria uma modulação QPSK.

É importante mencionar que o mecanismo de adaptação de enlace deve estar coordenado com o processo de agendamento de pacotes descrito na subseção anterior.

2.4.3 MIMO

A técnica MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) faz referencia ao uso de múltiplas antenas nos equipamentos de transmissão e/ou recepção (figura 2.14), oferecendo ganhos significativos nas taxas de dados, sem a necessidade de se utilizar mais banda ou potência adicional para a transmissão dos sinais.

Nos sistemas de comunicações sem fio, o uso desta técnica, tira proveito da propagação multi-percurso aumentando a taxa de transmissão e o alcance da comunicação, reduzindo as taxas de erro por bit.



Figura 2.14: Configuração de um sistema sem fio MIMO

2.5 LTE Advanced

LTE-Advanced (padronizada em 3GPP versão 10) surge como uma evolução de LTE versão 8 para cumprir com as especificações propostas pela ITU para as tecnologias IMT-Advanced [19] (*International Mobile Telecommunication-Advanced*). Entre os principais requisitos definidos para LTE-Advanced, [31] encontram-se os seguintes:

- Taxas de transmissão pico de até 1 Gbps no enlace descendente e 500 Mbps no enlace ascendente.
- Operar com larguras de banda de até 100 Mhz.
- Eficiência espectral pico de até 30 bps/Hz no enlace descendente e até 15 bps/Hz no enlace ascendente.
- Latências no plano de usuário menores que 10 ms
- Latências no plano de controle menores que 50 ms

Para conseguir atingir os requisitos listados acima, LTE-Advanced melhora algumas características de LTE (versão 8) e implementa algumas novas técnicas, entre elas:

- **Implementação de técnicas MIMO** 8x8 no enlace descendente e permitindo MIMO no enlace ascendente de 4x4.
- **Uso de agregação de banda (*Carrier Aggregation*)**, de até 5 portadoras de 20 Mhz, conseguindo desta forma obter uma largura de banda de até 100 Mhz.
- **Implementação de técnicas CoMP (comunicação cooperativa)**, que permite que diferentes estações rádio-base trabalhem em conjunto para reduzir a interferência e aumentar a eficiência espectral na borda da célula.

- **Implementação de técnicas de retransmissão (*RN - Relay Nodes*)** com o objetivo de aumentar a cobertura e melhorar a vazão dos usuários localizados na borda da célula.

No capítulo a seguir, se apresenta em maior detalhe a implementação e características dos RN na tecnologia LTE-Advanced.

3 Relay Nodes

As tecnologias LTE e LTE-Advanced se caracterizam por implementar técnicas de transmissão que permitem ofertar elevadas taxas de transferência de informação com alta eficiência espectral. No entanto, são necessárias condições adequadas do canal para que os melhores esquemas de modulação disponíveis possam ser empregados, sendo este é o principal problema que experimentam os usuários situados na borda da célula, os quais apresentam os menores valores de SINR. Uma solução imediata para este problema é adotar uma estrutura mais densa, diminuindo a distância entre o terminal e a estação rádio-base, reduzindo conseqüentemente as perdas de propagação e melhorando as condições do canal.

Uma das metodologias para atingir este objetivo, que é considerada como fator chave em LTE-Advanced (versão 10), é o uso de técnicas de retransmissão (*Relaying*), que permitem melhorar a cobertura e vazão dos usuários na borda da célula, resultando em grande melhora no uso dos recursos da rede.

Neste capítulo são apresentadas as principais características dos nós de retransmissão (*RN - Relay Nodes*), suas diferentes classificações e finalmente os elementos principais de sua arquitetura.

3.1 Descrição Geral e casos de uso

O RN é um tipo de estação rádio-base de baixa potência que procura melhorar a cobertura da rede e vazão dos usuários na borda da célula sem precisar de uma ligação dedicada (p.e. por fibra ótica). Para isto, o RN é ligado à rede através de uma estação base conhecida como *Donor eNB (DeNB)*, usando os mesmos protocolos e recursos rádio da célula.

O enlace entre o DeNB e o RN é chamado de *Backhaul Link (BL)* e utiliza a interface U_n que é uma modificação da interface U_u especificada para o E-UTRAN, para a comunicação entre uma rádio-base (eNB) e o terminal de usuário, enquanto que o enlace entre o RN e o UE é chamado de *Access Link (AL)* usando a interface U_u .

Mediante a implementação deste dispositivo se espera obter melhores

condições de propagação e valores da razão entre sinal e interferência mais ruído (*SINR - Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) mais altos em comparação com o cenário onde a comunicação se faz diretamente entre o eNB e o UE.

Na figura 3.1, são ilustradas a arquitetura e as terminologias introduzidas no conceito celular.

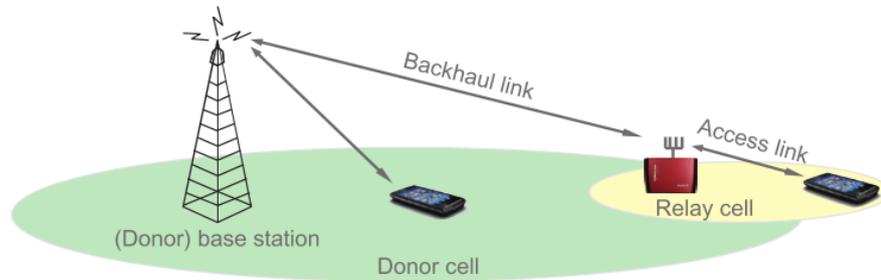


Figura 3.1: Enlaces AL e BL [32]

Os RN podem ser empregados para aumentar a cobertura é também para melhorar a vazão da célula, usualmente são instalados em lugares onde a SINR é insuficiente para conseguir os resultados esperados na comunicação.

Dentre os cenários típicos (figura 3.2) de uso dos RN, encontram-se os seguintes:

- a) Aumento da cobertura
- b) Aumento da vazão na borda da célula
- c) cenários *indoor*
- d) Cobertura de zonas de sombra

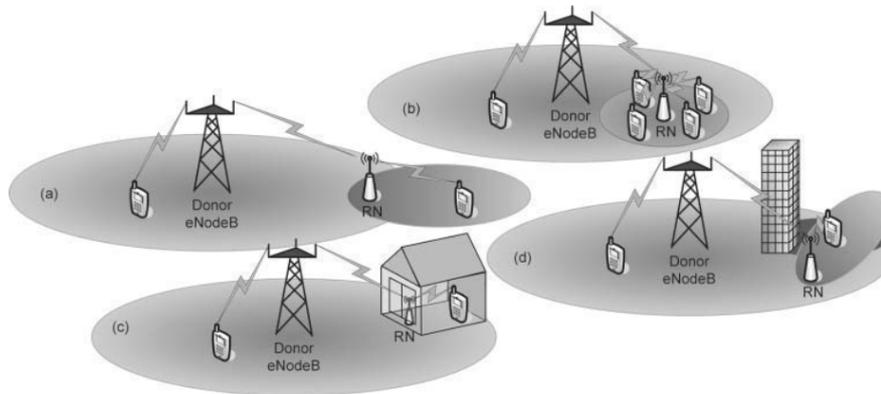


Figura 3.2: Casos de uso típicos dos RN a) Aumento de cobertura, b) aumento da vazão, c) cenários *indoor* e d) zonas de sombra

3.2

Classificação dos Relay Nodes

Os RN podem ser classificados de diferentes formas: de acordo com a camada de funcionamento, conforme com o uso do espectro nos enlaces AL e BL e de acordo com a perspectiva do usuário. A seguir se descrevem estas classificações.

3.2.1

Classificação de acordo com a camada de implementação

RN de camada física (Layer 1 - L1)

Os RN que trabalham na camada 1 (figura 3.3), conhecidos também como repetidores (amplificam e reenviam), são um tipo de retransmissores que no enlace descendente recebem os sinais da estação rádio-base que são amplificados e reenviados aos usuários sem nenhum tipo de processamento adicional, da mesma forma no enlace ascendente, o RN recebe os sinais produzidas pelos usuários sendo estes amplificados e retransmitidos para a estação rádio-base.

Dentre suas principais vantagens encontram-se seu funcionamento relativamente simples, retardos reduzidos e mínimos impactos sobre o padrão de tecnologia existente. Este tipo de RN é utilizado pelas tecnologias móveis de 2^a e 3^a geração para ampliar a cobertura em regiões rurais assim como também para melhorar a recepção em ambientes *in-door*.

No entanto, o uso destes dispositivos é limitado a ambientes que apresentem uma alta SINR, devido a que além de amplificar a sinal, amplificam o ruído e a interferência.

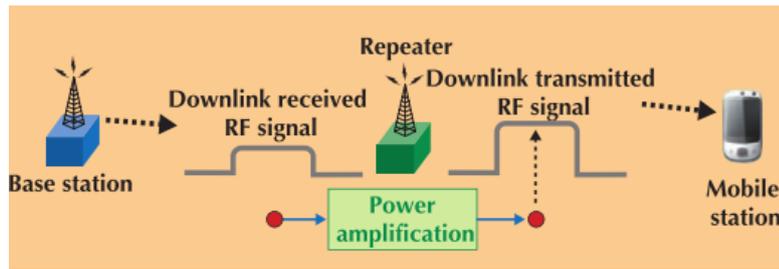


Figura 3.3: RN com funcionamento na camada 1 [33]

RN de camada de enlace (Layer 2 - L2)

Os RNs que funcionam na camada 2, são dispositivos que realizam funções de decodificação e reenvio, onde as sinais RF recebidas são demoduladas/decodificadas e moduladas/codificadas novamente antes de ser enviadas ao nó destino. Este processamento adicional evita a propagação do ruído e a interferência pela rede, permitindo também que eles sejam usados em situações que apresentam condições de SINR baixa. É importante mencionar que este tipo de RN gera um retardo adicional associado aos processos de demodulação/modulação e decodificação/codificação. O esquema geral deste tipo de RN é ilustrado na figura 3.4.

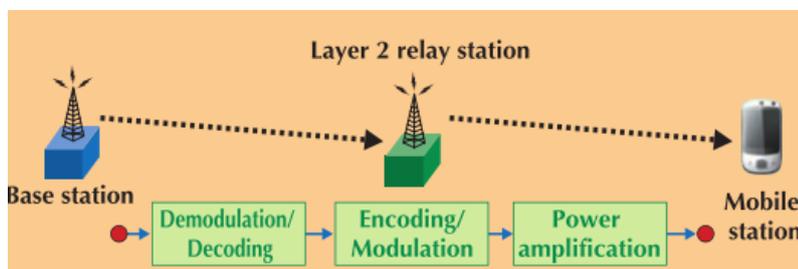


Figura 3.4: RN com funcionamento na camada 2 [33]

RN de camada de rede (Layer 3 - L3)

Os RN L3 além de realizar funções de demodulação/decodificação, realizam um processamento adicional sobre a informação do usuário na camada de rede incorporando as mesmas funcionalidades de uma estação rádio-base, permitindo assim haver um maior controle sobre a gestão e alocação de recursos da rede. É importante destacar que ao contrario dos RN L1 e L2, os RN L3 possuem seu próprio identificador de camada física (*Physical Cell ID - PCI*). Desta forma um RN-L3 é reconhecido pelas estações móveis como uma estação rádio-base, evitando a realização de mudanças nas especificações LTE nos terminais e permitindo que as mensagens de controle físico tais como o indicador da qualidade do canal (*Quality Channel Indicator - CQI*) e HARQ

sejam terminados na estação RN. No entanto, este tipo de RN introduz maiores retardos devido ao processamento adicional da informação.

O esquema deste tipo de RN é apresentado na figura 3.5.

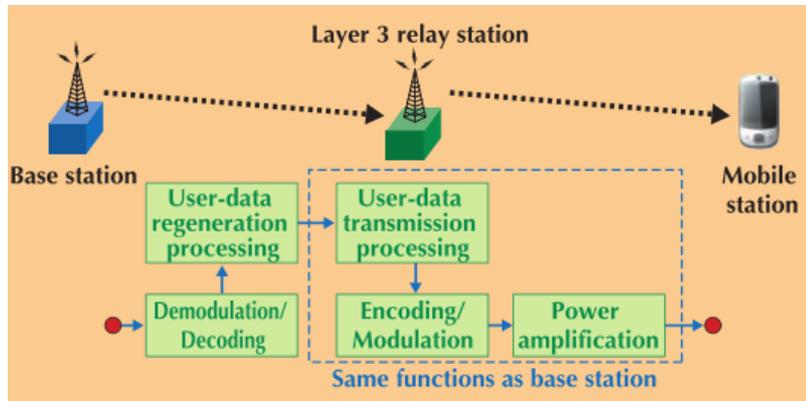


Figura 3.5: RN com funcionamento na camada 3 [33]

3.2.2 Classificação pelo uso do espectro

O RN comunica a estação rádio-base e com os terminais usando a interface aérea, por isso, é preciso evitar a interferência entre os enlaces AL e BL. Os dois casos principais de interferência são ilustrados na figura 3.6. Na figura 3.6.a, pode-se observar como no RN, a recepção no BL (sinais provenientes da eNB) são interferidas pela transmissão no AL (sinais do RN para os UEs). Analogamente, na figura 3.6.b, é ilustrada a interferência causada pela transmissão do RN para o eNB (BL) nas sinais enviadas dos usuários para o RN (AL). Por isto, é necessário implementar uma separação entre os dois canais (AL e BL), no domínio do tempo ou da frequência.

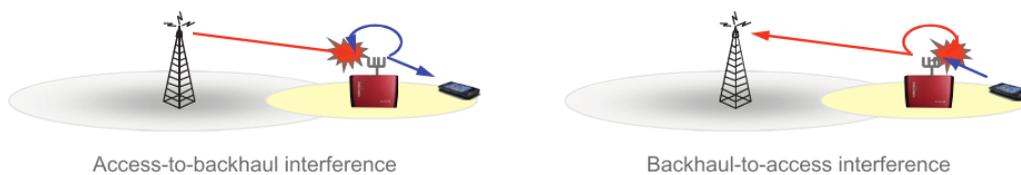


Figura 3.6: Interferência entre os enlaces AL e BL [32]

Conforme seja usado o espectro nos enlaces AL e BL, os RN podem ser classificados como *out-band* e *in-band*, como se ilustra na figura 3.7.

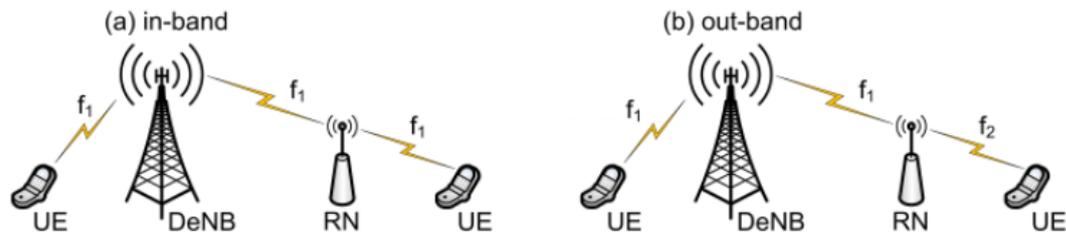


Figura 3.7: Modos de funcionamento dos RN (a) in-band, (b) out-band

RN de tipo out-band

Neste tipo de RN, os enlaces AL e BL funcionam em portadoras diferentes, contemplando assim a separação no domínio da frequência. Desta forma devido à ausência de restrições de operação no tempo, o RN pode manter uma comunicação *full-duplex* sem precisar mudanças adicionais na interface rádio padronizada no LTE versão 8.

RN de tipo in-band

Neste tipo de RN, os enlaces AL e BL funcionam na mesma faixa de frequências, precisando assim mecanismos adicionais para evitar interferência. São contempladas duas metodologias. A primeira é baseada na separação espacial mediante uma adequada instalação das antenas que permite conseguir o isolamento desejado entre os enlaces, conservando uma comunicação *full-duplex* (p.e. BL funcionando em uma situação *out-door* e o AL em um ambiente *in-door*). Caso não seja possível atingir dito isolamento mediante o mecanismo mencionado anteriormente é preciso utilizar uma separação no domínio do tempo, por conseguinte o RN apresentará uma comunicação *half-duplex*. No processo de padronização de LTE-Advanced versão 10, no documento 3GPP TS 36.814 [17] são definidos os mecanismos e formatos de quadro para oferecer esta funcionalidade.

3.2.3

Classificação conforme a perspectiva do usuário

Os RN podem ser classificados conforme a perspectiva do usuário [34] tal como se ilustra na figura 3.8.

Transparentes

Nos RN transparentes, o UE não percebe que sua comunicação com a rede de acesso é feita através do RN. O UE recebe a informação do usuário

através do RN enquanto a sinalização de controle é recebida desde o eNB. Este tipo de RN é utilizado principalmente para aumentar a vazão dos usuários na borda da célula.

Não transparentes

Neste caso o UE recebe tanto a sinalização de controle quanto a informação usuário através do RN. Este tipo de RN é utilizado principalmente na borda da célula para ampliar cobertura.

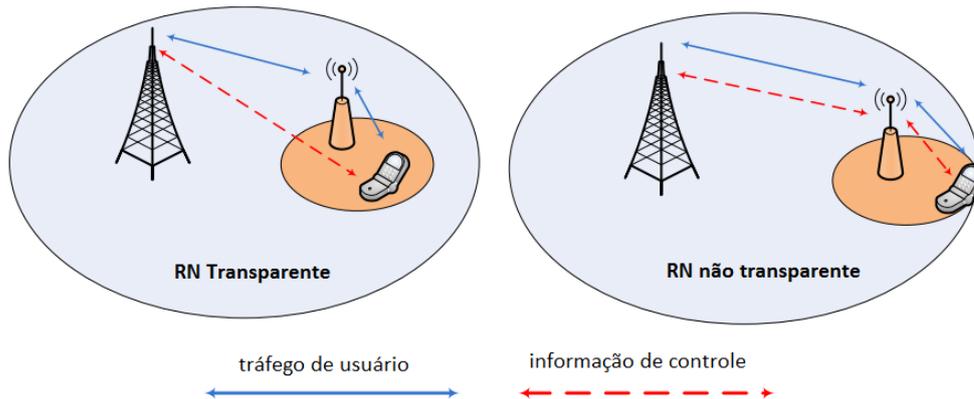


Figura 3.8: tipos de RN desde a perspectiva do usuário

3.2.4 Classificação adotada pela 3gpp

A 3GPP estabelece a classificação dos RN conforme suas funcionalidades e modos de operação, descritas a seguir:

RN tipo 1

Este tipo de RN é caracterizado por possuir seu próprio identificador físico de rede, incluindo a transmissão dos seus próprios canais de sincronização e símbolos de referência. Desde a perspectiva do UE, o RN aparece como se fosse uma estação rádio-base (LTE versão 8) independente, recebendo e enviando informação de controle e fazendo alocação de recursos.

O isolamento entre os enlaces AL e BL pode ser conseguido através da separação em tempo, frequência ou na configuração das antenas, assim, a 3GPP, considerou 3 tipos de RN tipo 1:

- **Tipo 1:** Este RN, oferece uma comunicação half-duplex mediante transmissões *in-band*, onde o AL e BL compartilham a mesma banda de

frequências. A separação é feita no domínio do tempo reservando alguns quadros para o enlace BL e que conseqüentemente não podem ser utilizados pelo enlace AL.

- **Tipo 1.a:** Este RN opera de forma *out-band*, utilizando portadoras diferentes para os enlaces AL e BL, assim, a separação é feita no domínio da frequência, conseguindo oferecer uma comunicação *full-duplex* e gerando um impacto mínimo nas especificações dos protocolos da interface rádio.
- **Tipo 1.b:** Este tipo de RN apresenta transmissão *in-band* oferecendo suficiente isolamento entre as antenas usadas nos enlaces AL e BL permitindo uma comunicação full-duplex. Este isolamento entre enlaces é conseguido em alguns cenários mediante diretividade e espaçamentos adequados das antenas (p.e. exterior e interior de um túnel).

RN tipo 2

Os RN tipo 2 não possuem seu próprio identificador de rede, e por tanto é transparente aos UE e não cria células próprias. A informação de controle pode ser enviada pela eNB e a informação de usuário pelo RN.

Este tipo de RN apresenta uma transmissão de tipo *in-band* e é utilizado geralmente para melhorar a vazão dos usuários na borda da célula.

3.3

Arquitetura e protocolos do Sistema

3.3.1

Arquitetura geral

O RN apresenta um funcionamento dual desde a perspectiva da arquitetura do sistema implementando funcionalidades próprias de um eNB quando se comunica com os usuários mediante o enlace de acesso, e funcionalidades do usuário quando estabelece a comunicação com a DeNB. A arquitetura geral é ilustrada na figura 3.9. Um dos aspectos chave desta arquitetura é que o DeNB se comporta como um *proxy* entre o núcleo da rede e o RN. Desde a perspectiva do RN, este está ligado diretamente ao núcleo da rede, e o DeNB é visto como um MME/S-GW na interface S1, e como um eNB na interface X2.

Desde a perspectiva do núcleo da rede, o RN aparece como se pertencesse ao DeNB. O *proxy* no DeNB é o responsável de associar estes dois pontos de vista.

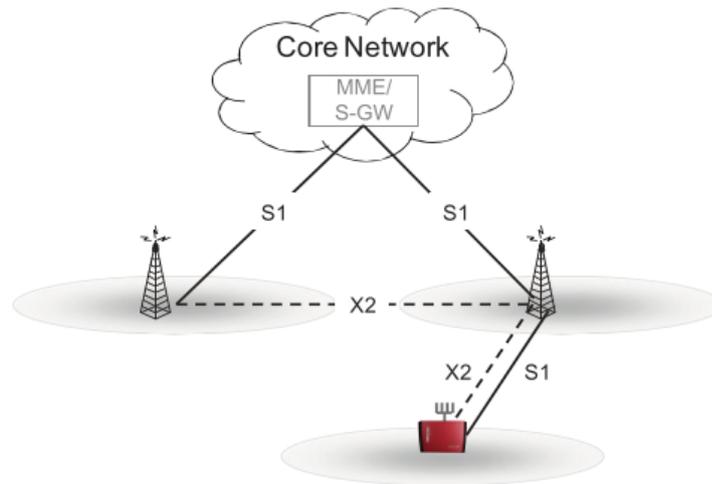


Figura 3.9: Arquitetura geral de uma rede LTE-A com implementação de RN [32]

3.3.2

Protocolos Rádio para RN

O RN está equipado com os mesmos protocolos rádio definidos para o eNB e o UE. Particularmente para um RN-L3 se implementam os seguintes protocolos:

- *Packet Data Convergence Protocol (PDCP)* [27], para a cifragem de dados do usuário e a compressão de cabeçalhos.
- *Medium Access Control (MAC)* [29], usado para o agendamento dos recursos rádio e o controle de erros através do HARQ.
- *Radio Link Control (RLC)* [28], utilizado para o controle das retransmissões ARQ, a concatenação/segmentação/re-montagem das unidades de serviço de dados SDU e a entrega em sequencia dos pacotes.
- *Radio Resource Control (RRC)* [35], para o controle de mobilidade, controle de QoS e segurança.

Na figura 3.10 se ilustram os protocolos rádio utilizados pelos dispositivos envolvidos na comunicação (DeNB, RN e UE) nos planos de controle (a) e de usuário (b) para um RN de camada 3.

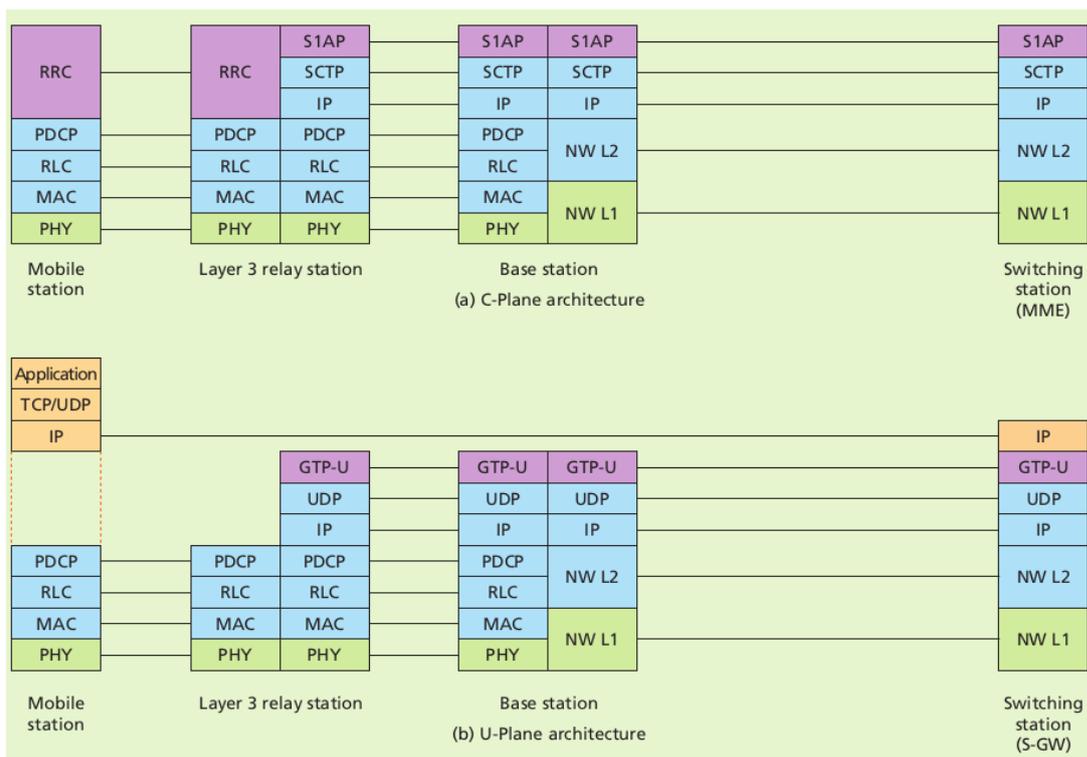


Figura 3.10: Protocolos Rádio, planos de a) controle e b) usuário [33]

4 Modelo de Simulação

Neste capítulo se apresentam as ferramentas utilizadas durante a simulação em conjunto com as modificações e desenvolvimentos realizados para que fosse possível avaliar o desempenho de aplicações de vídeo em redes LTE integrando *Relay Nodes* (RN).

Na sequência serão apresentados os cenários e experimentos de simulação, concluindo com a descrição detalhada do processo que foi usado durante a simulação.

4.1 Ferramentas Utilizadas

4.1.1 Hardware

As simulações foram realizadas num computador estândar com as seguintes características

- Processador Intel core i3-370M
- Memória RAM de 4 Ghz DDR3

É importante destacar que para a análise dos resultados e a reconstrução dos vídeos são necessários vários GB de memória de armazenamento, devido a que os arquivos de rastreamento e arquivos de tipo YUV (vídeo sem compressão) apresentam tamanhos consideráveis. Neste trabalho foram utilizados em torno dos 30 Gb.

4.1.2 Sistema Operacional

A maioria das ferramentas de simulação utilizadas são parte de projetos de código aberto compilados com ferramentas de desenvolvimento baseadas em Unix.

Abaixo seguem as características do sistema operacional utilizado:

- Sistema Operacional Ubuntu Versão 12.04 (precise) de 64-bit

- Kernel Linux 3.2.0-25-generic
- Compilador gcc/g++ 4.6

4.1.3

Simulador de Rede: LTE-Sim

LTE-Sim [15] é um simulador de redes LTE de código aberto escrito em C++, sobre licença GPLv3, que permite avaliar eventos a nível do sistema (eventos discretos). Na versão atual (V4), encontram-se modelados 4 tipos de nós: UE, eNB, GW/MME e HeNB, os quais podem ser tanto o origem quanto o destino dos fluxos de dados, através da utilização de portas e endereços IP. Este simulador inclui vários aspectos relevantes das redes LTE do E-UTRAN e do EPS, particularmente o suporte de cenários multi-usuário, mobilidade de usuário, gestão de QoS e estratégias de alocação de recursos.

A seguir são apresentadas as principais características do Simulador:

Protocolos

LTE-Sim implementa varias funcionalidades dos planos de controle e de usuário referentes a pilha de protocolos de LTE. Na figura 4.1 se ilustra a interação entre as entidades envolvidas desde que o pacote é gerado até que é recebido.

Durante a simulação, a camada de aplicação cria os pacotes que são enviados para a camada de transporte (Na versão atual do simulador apenas o protocolo UDP se encontra desenvolvido), depois, um classificador IP é utilizado para mapear os datagramas IP nas *Radio Bearers* correspondentes. Cada portadora mantém sua própria fila FIFO de transmissão.

Quando um pacote é enfileirado, se adiciona um cabeçalho PDCP que fornece funcionalidade de compressão pelo protocolo *Robust Header Compression* (ROHC) [36], diminuindo o tamanho do cabeçalho de rede RTP/UDP/IP para 3 bytes. Finalmente quando o pacote é retirado da fila, são adicionados os cabeçalhos RLC e MAC.

Gestão de recursos Rádio

LTE-Sim opera com todas as configurações de larguras de banda (1.4, 3, 5, 10, 15 e 20 Mhz) definidas para LTE e de acordo com o padrão [37] permite a gestão de recursos rádio dinamicamente nos domínios do tempo e frequência. No domínio do tempo, os recursos são distribuídos em intervalos de tempo de transmissão (TTI - *Transmission Time Interval*), cada um com duração de 1 ms. No domínio da frequência, a largura de banda é dividida em sub-canais

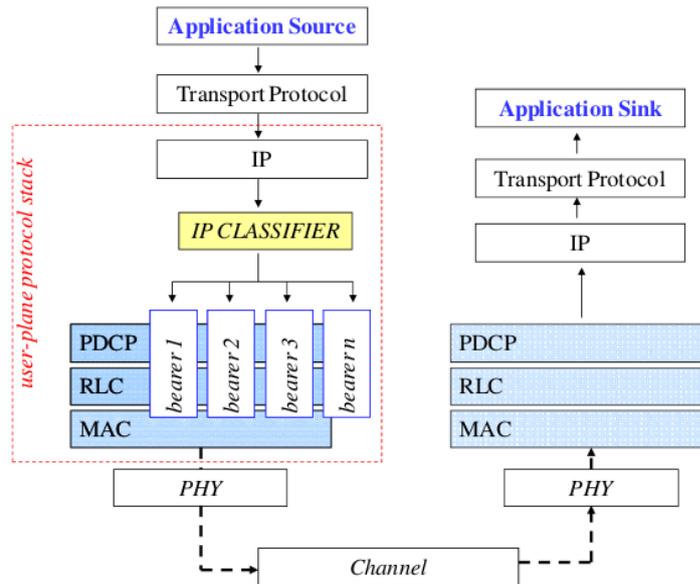


Figura 4.1: Protocolos implementados em LTE-Sim [15]

de 180 kHz. Assim, a unidade mínima que pode ser agendada a um usuário para a transmissão de dados é chamada de *Physical Resource Block* (PRB) e corresponde ao conjunto de um TTI em um sub-canal de 180 KHz.

Para realizar a distribuição dos PRB entre os usuários, foram implementados no simulador mecanismos de estimação do canal (no UE), e o envio de mensagens de controle CQI, para que o mecanismo de agendamento de pacotes (no eNB) aloque os PRB de forma eficiente. Além disso, baseando-se nos relatórios de CQI o simulador implementa as funções do módulo de modulação e codificação adaptativo (AMC - *Adaptive Modulation and Coding*), as quais selecionam para cada usuário o tamanho do *Transport Block* (TB) e o esquema de modulação/codificação mais adequado, tentando maximizar a eficiência espectral.

Canal e camada física

Com a finalidade de diminuir a complexidade do Sistema, a ferramenta LTE-Sim não implementa a camada física de forma completa, neste caso, utiliza uma aproximação através um modelo analítico tal como é feito em outros simuladores disponíveis (NS-2, NS-3, Omnet++, etc).

Cada dispositivo de rede tem associada uma instancia da classe que modela a camada física e encontra-se ligada ao canal com a finalidade de realizar varias funções, entre elas: i) a estimação da Razão Sinal/Ruído (SINR), ii) a escolha do esquema de modulação-codificação apropriado antes

da transmissão de dados e iii) o acesso ao canal para permitir o envio/recepção de pacotes.

As classes que modelam o Canal tem sido desenvolvidas para lidar com a transmissão de pacotes, tendo em conta vários fatores que alteram a potência do sinal transmitido, entre eles, i) as perdas propagação, ii) perdas de penetração, iii) desvanecimento em larga escala associado ao sombreamento e iv) o desvanecimento em pequena escala devido ao multipercurso.

Criação de cenários e resultados do Simulador

Em LTE-Sim os cenários são criados como funções estáticas em arquivos C++, nos quais são especificados parâmetros, ligações e quantidades dos objetos a serem simulados (células, eNB, UE, etc).

Como resultado, durante a execução do programa são exibidos todos os eventos ocorridos durante a simulação. Na figura 4.2, ilustra-se um exemplo da saída produzida.

```

casfranco@casfranco-casa: ~/workspace/LTE-SimV8
RX VIDEO ID 7017 B 3 SIZE 126 SRC -1 DST 5 D 0.003 0
RX VIDEO ID 7019 B 0 SIZE 169 SRC -1 DST 2 D 0.004 0
RX VIDEO ID 7020 B 1 SIZE 169 SRC -1 DST 3 D 0.005 0
RX VIDEO ID 7021 B 2 SIZE 169 SRC -1 DST 4 D 0.006 0
TX VIDEO ID 7022 B 3 SIZE 143 SRC -1 DST 5 T 49.34 0
TX VIDEO ID 7023 B 4 SIZE 125 SRC -1 DST 6 T 49.34 0
TX VIDEO ID 7024 B 0 SIZE 1071 SRC -1 DST 2 T 49.34 0
TX VIDEO ID 7025 B 1 SIZE 1071 SRC -1 DST 3 T 49.34 0
TX VIDEO ID 7026 B 2 SIZE 1071 SRC -1 DST 4 T 49.34 0
RX VIDEO ID 7023 B 4 SIZE 125 SRC -1 DST 6 D 0.002 0
RX VIDEO ID 7022 B 3 SIZE 143 SRC -1 DST 5 D 0.003 0
RX VIDEO ID 7024 B 0 SIZE 1071 SRC -1 DST 2 D 0.005 0
RX VIDEO ID 7025 B 1 SIZE 1071 SRC -1 DST 3 D 0.007 0
RX VIDEO ID 7026 B 2 SIZE 1071 SRC -1 DST 4 D 0.009 0

```

Figura 4.2: Exemplo de saída produzida por LTE-Sim

A primeira coluna determina num instante específico se o evento é de transmissão ou de recepção. A segunda coluna descreve o tipo de pacote, neste caso vídeo.

Segue a descrição das colunas restantes.

- ID: Identificador do pacote. Este número é único para cada pacote.
- B: Identificador de portadora. Identifica a portadora utilizada para mapear o pacote.
- SRC: Identificador de origem. Identifica o nó que envia o pacote.
- DST: Identificador de destino. Identifica o nó que recebe o pacote.

- T: tempo. Representa o tempo no qual o pacote foi criado.
- D: Representa o retardo que o pacote sofreu até chegar ao destino na camada de aplicação.

4.1.4 Ferramenta Evalvid

A avaliação dos fluxos de vídeo foi realizada com o uso da ferramenta EvalVid [18]. Esta ferramenta fornece um conjunto de programas para a análise da qualidade de um sinal de vídeo transmitido sobre redes de comunicações reais ou simuladas. Além de estimar parâmetros de qualidade de serviço (retardo, perda de pacotes), EvalVid permite avaliar métricas objetivas e subjetivas da qualidade do vídeo recebido tais como PSNR e MOS.

A figura 4.3 ilustra o esquema de avaliação utilizado pelo EvalVid.

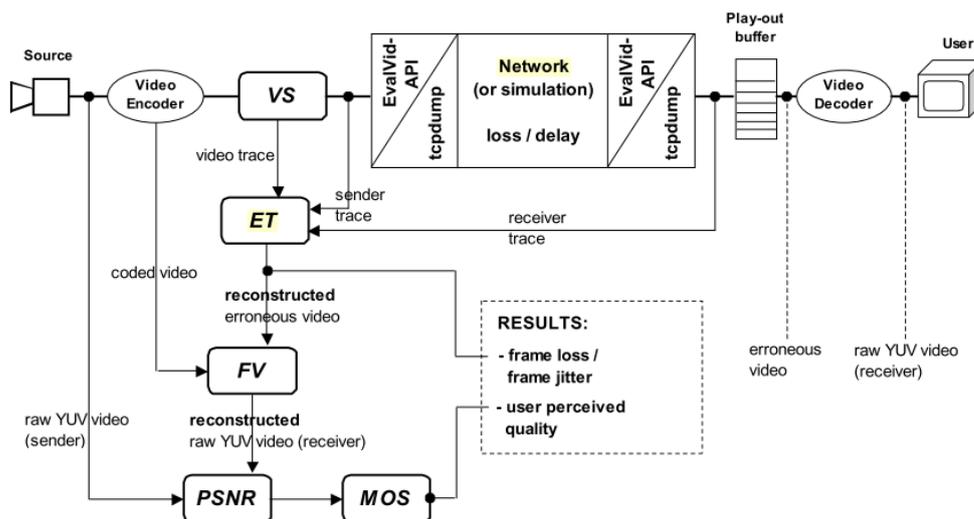


Figura 4.3: Esquema de avaliação utilizado pelo Evalvid [18]

Entre os principais componentes da ferramenta se encontram:

Codificador de Vídeo: O Evalvid trabalha apenas com a codificação de uma camada, incluindo H.264/AVC.

VS - Video Sender: Este componente lê o arquivo comprimido e o fragmenta em segmentos menores gerando um arquivo de rastreamento (*trace file*), o qual contém informações sobre o identificador, tipo, e tamanho do frame.

ET - Evaluate Trace: Baseando-se no arquivo original do vídeo codificado, no arquivo de rastreamento e nos detalhes da transmissão/recepção dos pacotes (identificadores e instantes de saída/chegada) o componente ET cria os relatórios dos parâmetros de QoS e gera o arquivo do vídeo recebido.

PSNR e MOS: Estes componentes calculam as métricas de qualidade de experiência (QoE - Quality of experience) comparando o arquivo de vídeo transmitido com o vídeo reconstruído quadro a quadro.

4.2

Desenvolvimentos realizados

No momento do desenvolvimento desta dissertação, não foram encontradas ferramentas de simulação de código aberto que a comunidade científica possa usar para avaliar o desempenho de todo o sistema LTE incluindo as funcionalidades dos RNs.

Para solucionar este problema, trabalhou-se com a ferramenta de código aberto LTE-Sim mencionada na seção 4.1.3, a qual foi modificada de acordo com os objetivos desejados. Nas seguintes subseções apresentam-se em detalhe os desenvolvimentos realizados para incluir o uso de RNs assim como também, a interface desenvolvida para integrar este simulador com ferramentas que permitiram avaliar o desempenho dos fluxos de vídeo mediante métricas de QoE.

4.2.1

Implementação dos Relay Nodes

Durante o trabalho da dissertação foram desenvolvidos classes e métodos para incluir no LTE-Sim RNs do tipo 1.a (*out of band*) conforme com as especificações e funcionalidades definidas no padrão da 3GPP [38] [17].

Dado que neste tipo de RN o enlace eNB-RN funciona em uma portadora diferente do enlace RN-UE, o isolamento entre eles ocorre no domínio da frequência permitindo sua operação nos mesmos instantes de tempo. Consequentemente, a implementação deste tipo de nós não requer mudanças adicionais nos protocolos rádio definidos na versão 8 do LTE.

Este nó foi modelado como uma combinação entre um UE e uma eNB, devido a que apresenta um comportamento dual. Quando o RN interage com o DeNB no enlace BL (*Backhaul Link*), este atua como se fosse um UE, porém, quando se comunica com os usuários no enlace AL (*Access Link*) este assume as funções de um eNB convencional.

Para o desenvolvimento do RN foram consideradas 3 fases tal como ilustra a figura 4.4. Nas fases um e dois, foram modeladas e implementadas as interações do RN com o DeNB e os UE respetivamente, considerando os parâmetros e modelos de propagação definidos em [17]. Já na fase 3 foram desenvolvidos os mecanismos de retransmissão usados pelo RN entre as interfaces AL e BL.

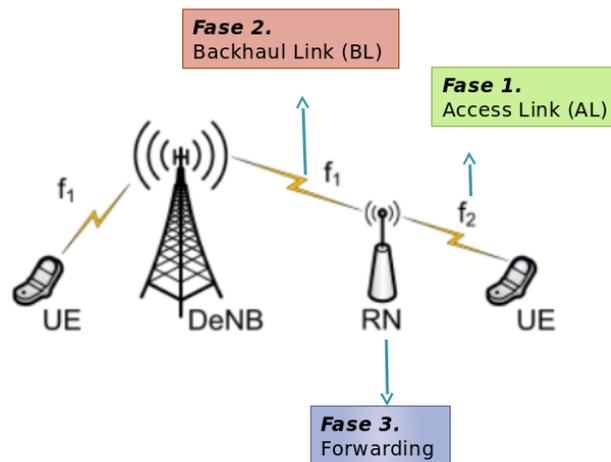


Figura 4.4: Fases do desenvolvimento do RN

Como resultado obteve-se um novo dispositivo (figura 4.5) que integra métodos, funções e características presentes tanto nos UE como nos eNB.

4.2.2 Integração LTE-Sim / Evalvid

Com a finalidade de avaliar o desempenho dos fluxos de vídeo e analisar métricas de QoE, realizou-se a integração entre as ferramentas LTE-Sim e Evalvid.

A partir de um arquivo real de vídeo, Evalvid fornece o *Video Trace File* que contem os detalhes dos pacotes a ser transmitidos na rede simulada pelo LTE-Sim. Como resultado da Simulação é obtido um arquivo com os detalhes de todos os eventos ocorridos, estes detalhes são utilizados pelo Evalvid para calcular retardos, perda de pacotes e as métricas de QoE.

A figura 4.6 ilustra os módulos desenvolvidos na interface entre Evalvid e LTE-Sim assim como também o procedimento geral utilizado para avaliar as métricas de qualidade de QoE.

O Módulo de Ajuste encaixa o *Video Trace File* num tipo de formato legível pelo LTE-Sim, o módulo de análise cria os arquivos com os detalhes

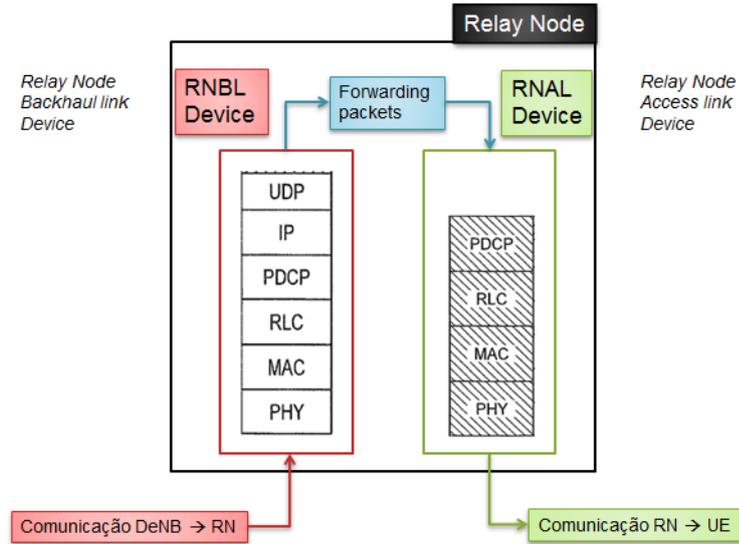


Figura 4.5: Esquema do RN desenvolvido

da transmissão e recepção dos pacotes requeridos pelo Evalvid para reconstruir o vídeo recebido pelo usuário e calcular posteriormente as métricas de desempenho.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112769/CA

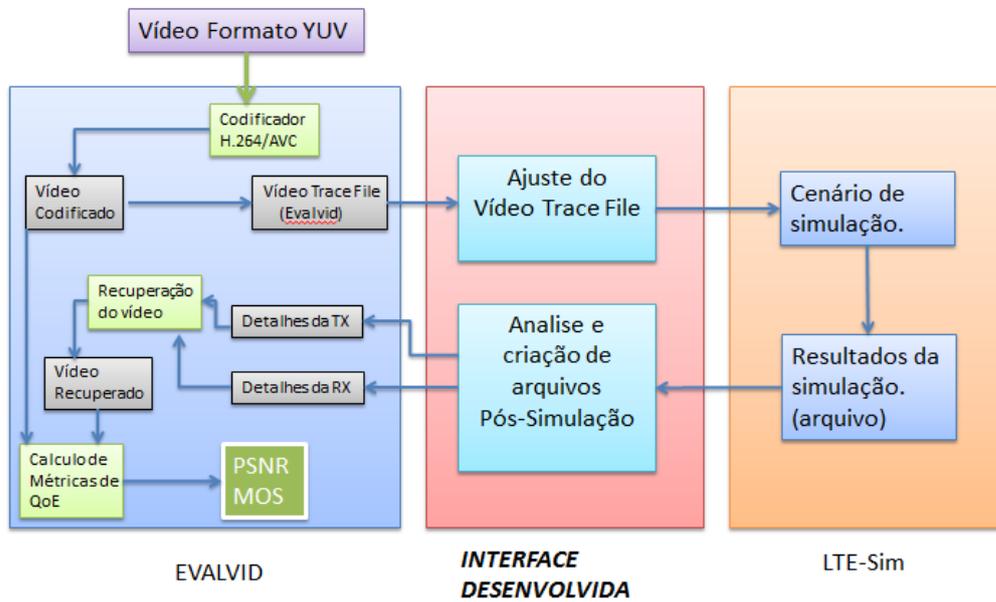


Figura 4.6: Interface desenvolvida para integrar Evalvid e LTE-Sim

4.2.3 Limitação do Modelo implementado

Segundo as especificações da 3GPP para a arquitetura do RN em LTE-A (documento TS 36.860 [16]), o tráfego de usuário é enviado desde o S/G-PW, através do DeNB e o RN, mediante o uso de mecanismos de mapeamento e multiplexação de unidades de transporte de usuário (*UE Bearers*) no BL entre o eNB e o RN. Desta forma, o tráfego de diferentes usuários (*UE Bearers*) é mapeado sobre um transporte RN (*RN Bearer*) único, tal como se ilustra na figura 4.7.

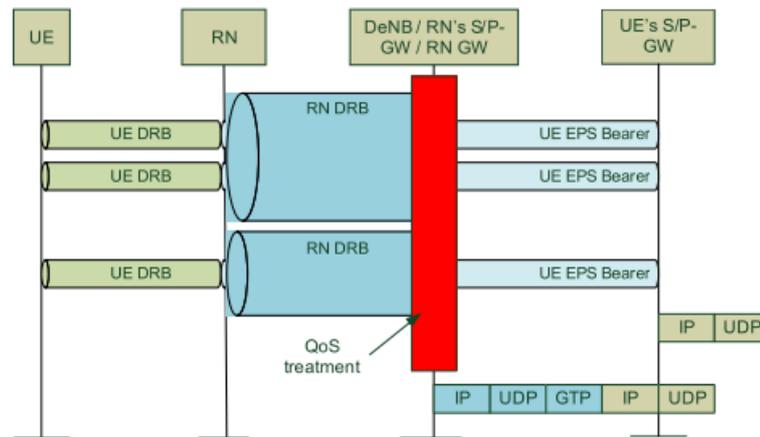


Figura 4.7: Processamento de pacotes e funcionalidade de tunelamento na tecnologia LTE-Advanced [16]

Como o simulador usado nesta pesquisa está baseado na versão 8 do LTE e não implementa os mecanismos mencionados anteriormente, não foi possível simular eventos de multiplexação e encaminhamento de varias unidades de transporte de usuário em unidades de transporte de RN. Desta forma, para conservar a validade dos experimentos, nos cenários de simulação cada RN poderá atender no máximo um terminal. Neste caso, a perda de pacotes no enlace de acesso (comunicação entre o RN e o UE) será mínima, tal como aconteceria numa situação com múltiplos usuários sem ocorrência de congestionamento.

Este aspecto seria limitante para o caso em que se deseje avaliar o aumento da capacidade na célula causado pelo RN, porem, não é um obstaculo para atingir os objetivos propostos neste trabalho.

4.3

Cenários de Simulação

Nesta seção, apresenta-se a descrição dos cenários implementados dos experimentos realizados, os parâmetros usados para modelar o E-UTRAN e finalmente das características do tráfego utilizado nas simulações.

4.3.1

Cenários e experimentos implementados

Foram desenvolvidos vários cenários comparando o desempenho da rede sem/com a utilização dos RN ao variar parâmetros do sistema tais como o número de Macro Usuários (M-UE), o número de RNs, o raio da célula e a taxa de codificação de vídeo usada pelo usuário da borda da célula.

Todos os cenários são compostos por uma eNB, um número variável de M-UE, e um R-UE por cada RN. Os M-UE são uniformemente distribuídos na célula e se movimentam a uma velocidade constante de 3 Km/h usando o modelo de mobilidade aleatória (*Random Walk Mobility Model*) [39].

Cada usuário recebe um fluxo de vídeo com duração de 80 segundos, o qual é iniciado em tempos diferentes de forma aleatória (entre 1 e 10 segundos).

Finalmente, os experimentos de simulação realizado tem uma duração de 90 segundos e os resultados são obtidos pela media de 5 simulações.

Nas subseções seguintes é apresentada uma descrição dos experimentos desenvolvidos.

Experimento 1

A figura 4.8 ilustra o cenário utilizado para este experimento cujo o objetivo é avaliar o desempenho para um usuário a diferentes distâncias da eNB, em uma célula de raio de 300 metros, quando esta contem uma quantidade variável de usuários. Todos os usuários recebem vídeo a 256 kbps a través da mesma eNB enquanto se movimentam a uma velocidade constante com exceção do usuário avaliado, o qual conserva sua posição durante toda a simulação.

A tabela 4.1 apresenta os principais parâmetros do experimento.

Experimento 2

Neste experimento procura-se avaliar a capacidade do RN para diferentes larguras de banda. No cenário desenvolvido, apenas foi simulado o enlace de acesso entre o RN e os R-UE, assumindo que não acontecem perdas de pacotes no enlace entre o RN e o eNB. O retardo é calculado como o tempo desde

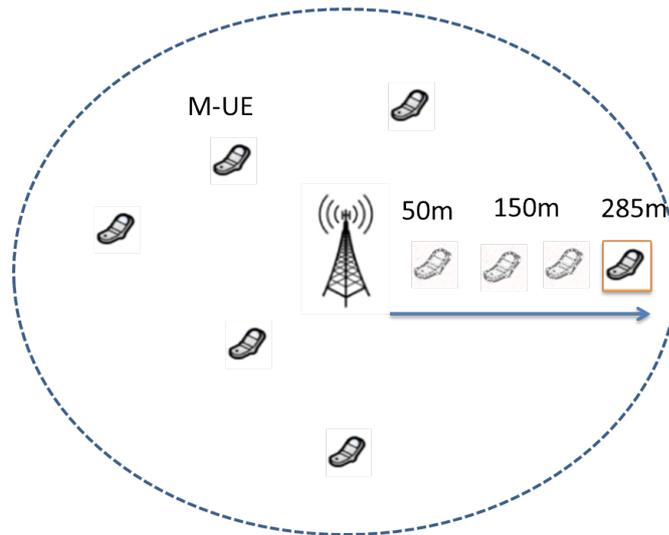


Figura 4.8: Experimento 1 - Usuário em diferentes lugares da célula

Parâmetro	Valor
radio da célula	300 m
posição do usuário fixo	60, 120, 200 e 285 m
número de usuários na célula	30, 35, 40, 45, 50
velocidade dos usuários	3 Kh/h
taxa de codificação do vídeo	256 kbps

Tabela 4.1: Parâmetros utilizados no experimento 1

que o pacote e recebido pelo RN até a ser entregue à camada de aplicação do usuário.

Na tabela 4.2 detalham-se os valores para o cenário considerado.

Experimento 3

O objetivo deste experimento é comparar o desempenho da rede e de um usuário na borda da célula quando se introduz o RN com relação ao mesmo cenário sem o emprego do RN. São variados o raio da célula, a posição do RN, a posição do usuário na borda da célula e a quantidade de macro usuários que se encontram recebendo fluxos de vídeo.

O cenário implementado é ilustrado na figura 4.9 e seus parâmetros são resumidos na tabela 4.3.

Experimento 4

O objetivo de este experimento é avaliar o desempenho da célula quando se introduzem vários RN. Este cenário contem 4 usuários estáticos localizados em 4 pontos diferentes na borda da célula, e um número variável de usuários

Parâmetro	Valor
raio da célula RN	40 m
larguras de banda do AL	1.4, 3, 5 Mhz
número de usuários	5, 10, 15, 20, 25, 30
velocidade dos usuários	3 Kh/h
taxa de codificação do vídeo	256 kbps

Tabela 4.2: Parâmetros utilizados no experimento 2

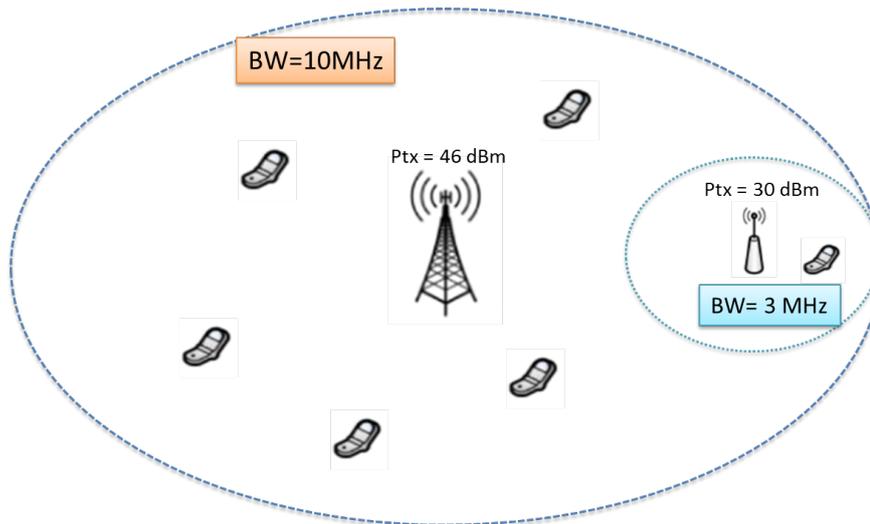


Figura 4.9: Experimento 3 - células com diferentes raios

móveis uniformemente distribuídos numa região que apresenta valores altos de razão Sinal Ruído.

A figura 4.10 ilustra o cenário desenvolvido e os parâmetros simulados são resumidos na tabela 4.4.

Experimento 5

Este experimento avalia o desempenho para o caso no qual um usuário estático localizado na borda da célula recebe vídeo com diferentes taxas de codificação enquanto se varia o número de usuários móveis da célula.

O cenário é similar ao ilustrado na figura 4.9. Os parâmetros são resumidos na tabela 4.5

4.3.2

Parâmetros da simulação do E-UTRAN

Na tabela 4.6 são apresentados os principais parâmetros de simulação utilizados na simulação do E-UTRAN em todos os experimentos mencionados na subseção anterior. Estes valores foram baseados nos modelos definidos pela 3GPP para a simulação de sistemas heterogêneos (tabela A.2.1.1.2-3 em [17]).

Parâmetro	Valor
raio da célula (variável)	260, 300, 340, 380, 420 m
posição do RN	Rádio da célula - 40 m
posição do usuário na borda da célula	Rádio da célula - 15 m
número de macro usuários	40
número de usuários no RN	1
velocidade dos usuários	3 Kh/h
taxa de codificação do vídeo	256 kbps

Tabela 4.3: Parâmetros utilizados no experimento 3

Parâmetro	Valor
raio da célula	300 m
posição dos RN (x,y)	(260,0), (-260,0), (0,260), (0,-260)
posição dos usuário na borda da célula (x,y)	(285,0), (-285,0), (0,285), (0,-285)
número de usuários	30, 35, 40, 45, 50
número de RN	0,1,2,4
número de usuários em cada RN	1
velocidade dos usuários	3 Kh/h
taxa de codificação do vídeo	256 kbps

Tabela 4.4: Parâmetros utilizados no experimento 4

Parâmetro	Valor
raio da célula	300 m
posição do RN	260 m
posição do usuário na borda da célula	285 m
número de usuários	30, 35, 40, 45, 50
número de RN	1
número de usuários no RN	1
velocidade dos usuários	3 Kh/h
taxa de codificação do vídeo (usuário na borda da célula)	512 kbps
taxa de codificação do vídeo (usuários móveis)	256 kbps

Tabela 4.5: Parâmetros utilizados no experimento 5

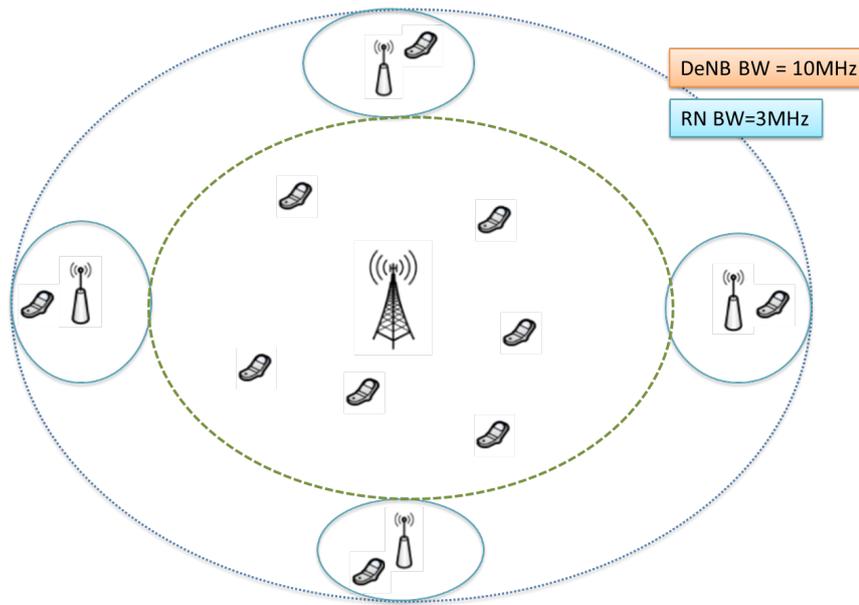


Figura 4.10: Experimento 4 - Vários RN na célula

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

Tabela 4.6: Parâmetros de simulação do E-UTRAN

4.3.3

Modelo do Tráfego

O tráfego de informação nos cenários de simulação é modelado a partir de um arquivo real de vídeo através da obtenção de arquivos de rastreamento (*trace files*). Estes arquivos não contém o fluxo de vídeo codificado, em vez disso, fornecem uma caracterização, proporcionando os tempos de transmissão e as quantidades (em bytes) requeridas para simular o transporte do fluxo numa rede de comunicações.

Para a obtenção dos arquivos de rastreamento utilizou-se o vídeo de referencia “Highway” disponível em [40], em formato YUV e resolução CIF (*Common Intermediate Format*) 352x288 pixels, o qual foi posteriormente codificado no padrão H.264/AVC com o uso da ferramenta Evalvid.

4.4

Métricas Avaliadas

A seguir, são apresentadas as métricas de qualidade de serviço e de qualidade de experiência utilizadas para avaliar o desempenho médio da rede e/ou para um usuário em particular.

4.4.1

Métricas de Qualidade de Serviço

Entre as métricas utilizadas para mensurar a QoS foram utilizadas as seguintes:

- **Taxa de Perda de Pacotes:** Esta métrica mede a taxa de erros da transmissão de pacotes IP entre dois pontos da rede. Seu valor foi calculado a partir da fórmula 4-1, onde $\sum P_{rx}$ representa o número total de pacotes recebidos e $\sum P_{tx}$ o total de pacotes enviados.

$$\text{Perda de pacotes (\%)} = \left(1 - \frac{\sum P_{rx}}{\sum P_{tx}} \right) \times 100 \quad (4-1)$$

- **Vazão:** Esta métrica mede a taxa média de bits que foi transportado com sucesso pela rede (p.e. entre o origem e o destino). Seu valor foi calculado a partir da equação 4-2, onde N representa o número total de pacotes recebidos com sucesso, D_i o tamanho em bytes do pacote i e T_f o tempo de duração do fluxo de vídeo.

$$\text{Vazão (bps)} = \frac{\left(\sum_{i=1}^N D_i \right) \times 8}{T_f} \quad (4-2)$$

- **Atraso Médio:** Este valor mede o tempo médio decorrido entre a geração do pacotes na camada de aplicação no emissor até o momento da recepção pela camada de aplicação no receptor. Seu valor foi obtido através da equação 4-3, onde Tg_i e Tch_i representam o tempo de geração e de chegada do pacote i e N o número total de pacotes recebidos com sucesso.

$$\text{Atraso médio (segundos)} = \frac{\sum_{i=1}^N (Tch_i - Tg_i)}{N} \quad (4-3)$$

4.4.2

Métricas de Qualidade de Experiência

A QoE é um parâmetro que representa o desempenho desde o ponto de vista dos usuários, e que coloca uma perspectiva pessoal de satisfação dos sinais de mídia transportados pela rede.

No caso da avaliação da qualidade do vídeo, este é realizado mediante o uso de métricas subjetivas ou objetivas. As métricas subjetivas baseiam-se na percepção humana, enquanto que as métricas objetivas baseiam-se em modelos matemáticos para estimar a média das opiniões dos usuários. Estas últimas, encontram-se classificadas conforme a disponibilidade do vídeo transmitido (de referência) da seguinte forma: de Referência Completa (FR-Full Reference) quando o sinal do vídeo transmitido está totalmente disponível, de Referência Reduzida (RR-Reduced Reference) quando as sequências do vídeo de referência não estão totalmente disponíveis, e Sem Referência (NR-No Reference) quando o vídeo transmitido não é acessível.

A continuação são listadas as métricas de QoE utilizadas neste trabalho:

- **Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR):** É uma métrica objetiva de referência completa, desenvolvida para emular a impressão de qualidade do sistema visual humano (*HVS - human visual system*), definindo a relação entre a máxima energia possível de um sinal e o ruído que afeta a representação do sinal entre os quadros de vídeo transmitido e de vídeo recebido (possivelmente degradado pela perda de pacotes).

O cálculo da PSNR encontra-se definido pela equação 4-4, onde d é o número de bits por pixel (componente de luminescência), W a largura da imagem, H a altura da imagem, e $p[i, j]$, $p'[i, j]$ são os pixels da i ésima linha e da j ésima coluna da imagem transmitida e da imagem recebida respectivamente.

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \frac{(2^d - 1)^2 WH}{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H (p[i, j] - p'[i, j])^2} \quad (4-4)$$

- **Mean Opinion Score (MOS):** está é uma métrica utilizada para avaliar a opinião subjetiva da qualidade de uma imagem ou vídeo. Segundo a recomendação dada pela ITU-R [41], um observador pode atribuir uma pontuação na escala de 1 a 5 percebido, tal como se ilustra na tabela 4.7.

Qualidade	Valor da Métrica	Grau do incômodo
Excelente	5	Imperceptível
Boa	4	Perceptível, mas sem incômodo
Regular	3	Leve incômodo
Pobre	2	Incômodo
Ruim	1	Muito incômodo

Tabela 4.7: Escala de qualidade MOS

Neste trabalho, os valores de MOS foram obtidos através da ferramenta *Evalvid* a partir dos valores obtidos para a PSNR.

4.5

Processo de simulação e de avaliação de Resultados

A figura 4.11 apresenta de forma detalhada o fluxo da informação através da simulação, envolvendo todos os programas e arquivos utilizados. A continuação são descritas as fases envolvidas durante o processo de simulação e avaliação de métricas.

4.5.1

Fase 1

Na primeira fase, o objetivo é obter um *video trace file* a partir de um vídeo real, que possa ser utilizado pelo LTE-Sim. Para isto, devem-se realizar os seguintes sub-processos:

- O vídeo original em formato YUV, é codificado pelo programa X264 o qual produz um fluxo H.264.
- O programa “MP4Box” cria um arquivo .mp4 (MPEG-4 Part 14) a partir do fluxo H.264.
- “mp4trace” utiliza o arquivo .mp4 para extrair os detalhes dos quadros que compõem o vídeo. Esta informação é armazenada no *Video Trace File*
- A ferramenta desenvolvida neste trabalho: “*Trace File Modifier*” ajusta o *Video Trace File* para que possa ser utilizado pelo LTE-Sim.

4.5.2

Fase 2

Na segunda fase, foi feita a simulação dos cenários descritos na subseção 4.3.1 no LTE-Sim, o qual dá como resultado vários arquivos de rastreamento com os detalhes de todos eventos ocorridos durante cada simulação.

4.5.3

Fase 3

Finalmente, na terceira fase são calculadas as métricas de QoS e QoE através dos seguintes sub-processos:

- A ferramenta desenvolvida neste trabalho: “*Trace Analyser*” obtém as métricas de QoS através do processamento dos arquivos de rastreamento. Adicionalmente, esta gera os arquivos necessários para que o Evalvid consiga processar e recuperar o arquivo de vídeo recebido.
- “etmp4” processa o arquivo de vídeo e os arquivos de rastreamento para reconstruir o vídeo transmitido como é observado pelo receptor
- O novo arquivo .mp4 é decodificado num arquivo YUV pelo programa “ffmpeg”.
- A ferramenta “PSNR” compara os arquivos YUV correspondentes aos vídeos transmitido e recebido dando como resultado a métrica PSNR.
- Fazendo uso dos valores no arquivo PSNR, a ferramenta “MOS” calcula a métrica MOS.

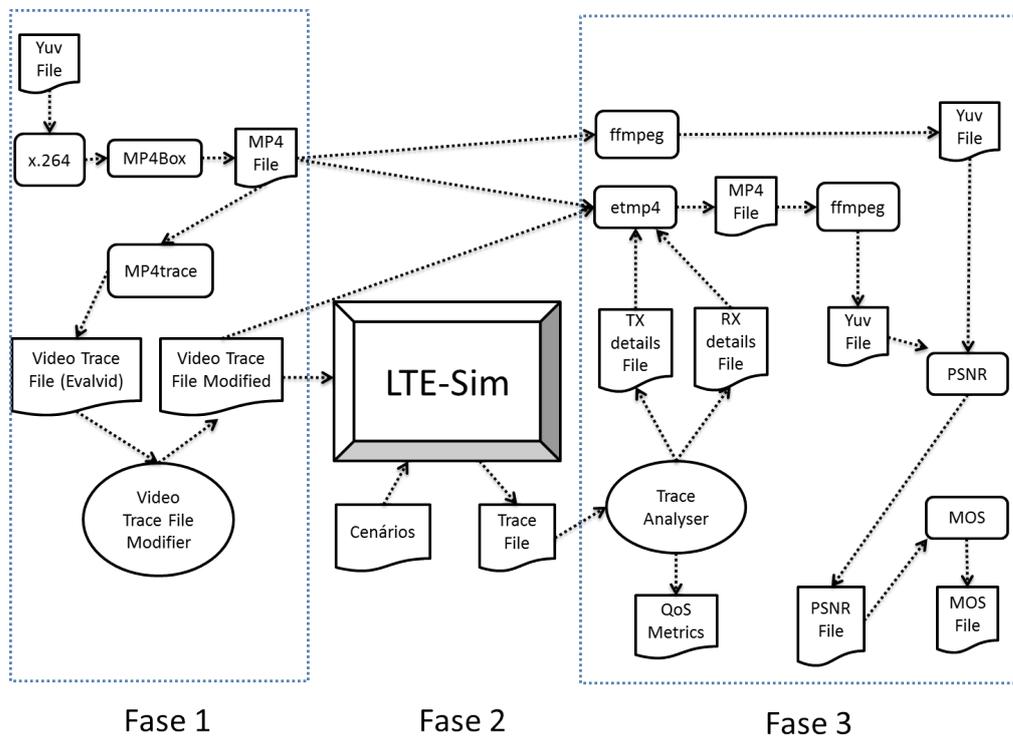


Figura 4.11: Processo detalhado de simulação e avaliação de métricas

5 Resultados da Simulação

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos dos experimentos realizados que foram descritos no capítulo anterior. A seguir, na seção 5.1 realiza-se uma análise focada em métricas de desempenho para mensurar a qualidade de serviço e o tráfego de pacotes na rede. Já na seção 5.2 avalia-se o desempenho obtido pelos fluxos de vídeo empregando métricas apropriadas para avaliar a qualidade da experiência percebida pelos usuários tais como a PSNR e MOS.

5.1 Análise das Métricas de QoS

Para cada experimento realizado, foram avaliadas e analisadas as principais métricas de QoS (perda de pacotes, vazão e atraso médio). Essa avaliação teve como objetivo principal identificar a contribuição que os RN aportam no funcionamento da célula e principalmente no desempenho dos usuários que se encontram afastados da eNB.

Os resultados são detalhados e ilustrados em figuras que representam os valores obtidos para (a) a totalidade de usuários e (b) o usuário próximo da borda da célula.

5.1.1 Experimento 1

Neste experimento o objetivo é avaliar e analisar o performance obtido por um usuário estático quando este se localiza em diferentes posições da célula para diversas condições de carga trafegada pela rede. A quantidade de tráfego foi estabelecido variando o número de usuários que se encontram recebendo vídeo simultaneamente.

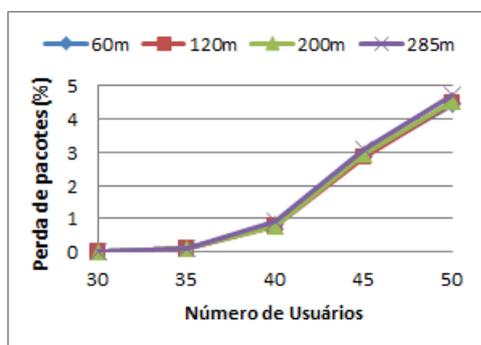
Os resultados são apresentados nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3. Na figura 5.1(a) se apresenta a relação entre a porcentagem de perda de pacotes médio da célula e o número de usuários que se encontram recebendo tráfego de vídeo. Nesta figura, pode-se observar que a partir dos 40 usuários a perda de pacotes é superior ao 1% quando a taxa de codificação de vídeo empregada é de 256

Kbps. Este resultado é similar ao encontrado na pesquisa feita pela Motorola [8] onde foi avaliada a capacidade de um sistema LTE para servir simultaneamente usuários com serviços de vídeo streaming conforme a taxa de transmissão utilizada.

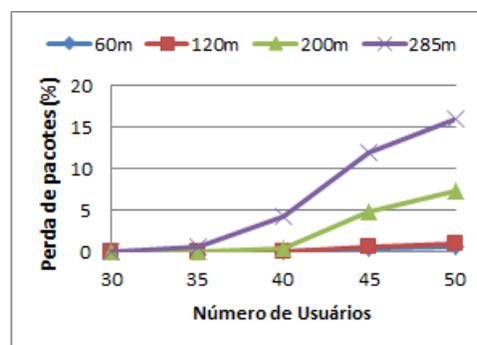
Focando a atenção no desempenho do usuário fixo, nas figuras 5.1(b) e 5.2(b) pode-se observar o efeito no desempenho do serviço em relação à distância à qual este se encontra da eNB. Para este caso, quando o usuário está localizado antes dos 120 metros, ainda em situação de congestionamento (50 UE), seu desempenho permanece sem ocorrência de erros, porém, quando este se encontra mais próximo da borda da célula, para o caso limite de 40 usuários, a perda de pacotes acende até 5% e a vazão decresce em torno dos 230 kbps, enquanto que para uma situação de congestionamento, com 50 usuários, a perda de pacotes chega a 15% e a vazão diminui a um valor de 200 kbps.

Podemos afirmar que este comportamento é causado principalmente por dois fatores: o primeiro encontra-se relacionado com o funcionamento do agendador (*Scheduler*), neste caso de tipo *Proportional Fair* (PF), a métrica calculada para determinar qual UE deve transmitir considera o estado do canal experimentado pelos usuários. Desta forma, aqueles UE que estão perto da eNB experimentam uma melhor SINR e por tanto terão uma maior probabilidade de transmitir.

O segundo fator está relacionado com os esquemas de modulação e codificação utilizados, os quais também dependem da SINR observada pelo usuário. Neste caso, os terminais que estão perto da eNB conseguem fazer uso dos esquemas que apresentam maior eficiência espectral e maior taxa de transmissão tal como 64 QAM, enquanto que os usuários da borda da célula apresentam menor SINR sendo necessária a utilização de esquemas de modulação/codificação mais robustos, porém com menores taxas de transmissão, tal como QPSK.

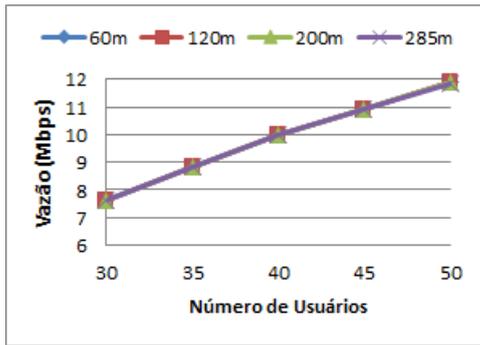


5.1(a):

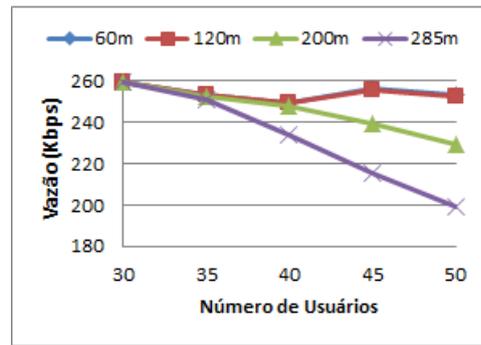


5.1(b):

Figura 5.1: Perda de pacotes no experimento 1. 5.1(a) médio da rede e 5.1(b) usuário próximo da borda da célula.



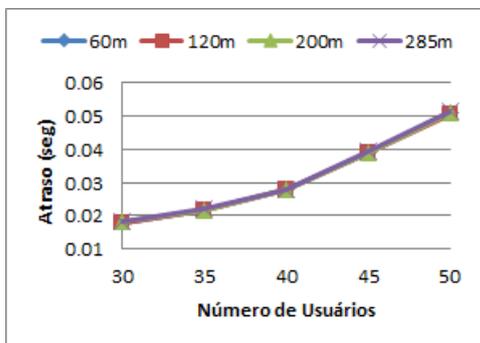
5.2(a):



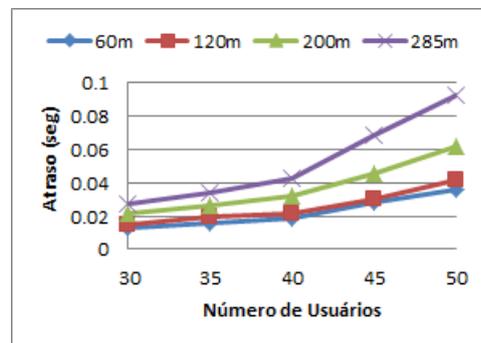
5.2(b):

Figura 5.2: Vazão no experimento 1. 5.2(a) média da rede e 5.2(b) usuário próximo da borda da célula.

Na figura 5.3 pode-se observar o aumento do atraso fim a fim introduzido pela rede à medida que aumenta o número de usuários. Além disso, se observa que o atraso experimentado pelos pacotes é maior quando o UE se encontra próximo da borda da célula do que quando se encontra perto da eNB, isto está relacionado com os dois fatores mencionados anteriormente, principalmente com o funcionamento do agendador o qual dá maior prioridade aos UE com melhores condições de canal.



5.3(a):



5.3(b):

Figura 5.3: Atraso médio na entrega de pacotes no experimento 1. 5.3(a) médio da rede e do 5.3(b) usuário fixo na posição estabelecida.

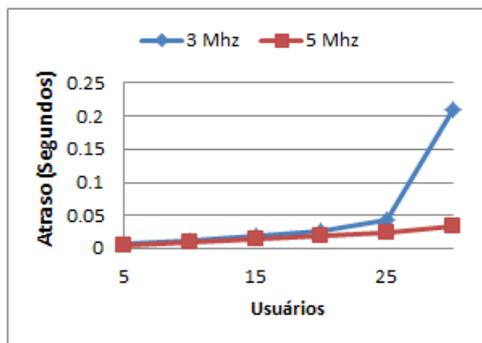
5.1.2 Experimento 2

O objetivo deste experimento foi determinar o número máximo de usuários que um RN pode atender simultaneamente no enlace de acesso (*Access Link - AL*) sem que haja ocorrência de erros. Posteriormente é comparado o desempenho obtido por um UE dentro do RN para duas diferentes larguras de banda: 3 e 5 Mhz.

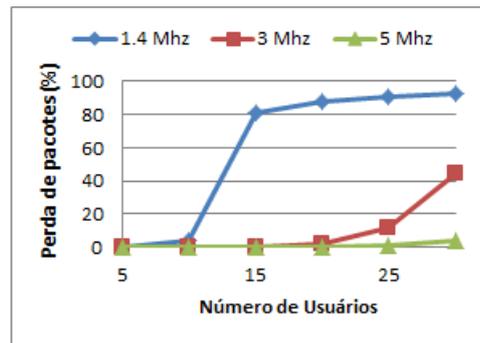
A primeira análise consistiu em avaliar apenas o enlace de Acesso entre os UE e o RN, considerando uma perda de pacotes de zero no *Backhaul Link* (enlace entre o RN e o DeNB). A figura 5.4 mostra os valores das métricas de QoS ao variar o número de usuários.

Segundo os resultados observados na figura 5.4(b) pode-se determinar o número máximo de usuários que conseguem receber vídeo simultaneamente atingindo uma perda de pacotes média menor do que 1%. Assim, para as três larguras de banda avaliadas: 1.4, 3 e 5 Mhz o número máximo de usuários é de 5, 15 e 25 respectivamente.

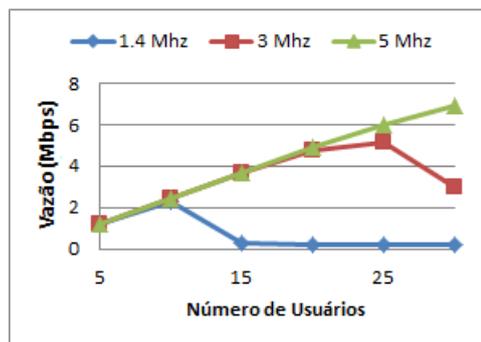
Na segunda parte deste experimento analisou-se o desempenho da célula sem e com o uso do RN para diferentes larguras de banda no AL. Observa-se que para este caso, no qual o RN só tem 1 usuário, a diferença nos resultados usando larguras de banda de 3 e 5 Mhz é mínima dado que no AL não acontecem perdas de pacotes, e a perda no BL não depende deste largura de banda utilizada. Os resultados obtidos nas figuras 5.6 e 5.7 apresentam valores similares aos obtidos nos experimentos anteriores.



5.4(a):

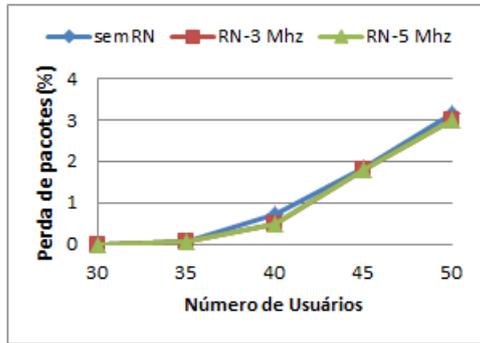


5.4(b):

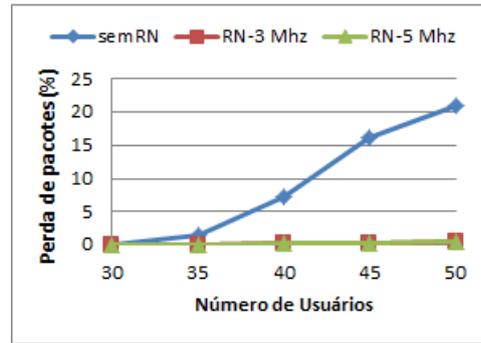


5.4(c):

Figura 5.4: Métricas obtidas para o enlace de acesso no experimento 2, 5.4(a) atraso, 5.4(b) perda de pacotes e 5.4(c) vazão.

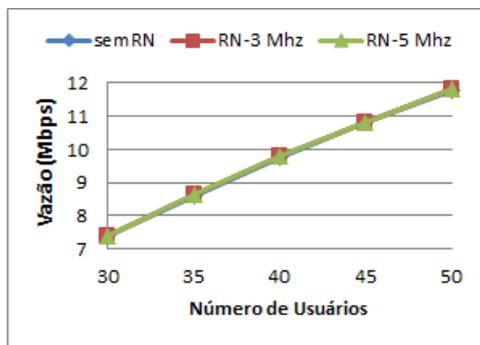


5.5(a):

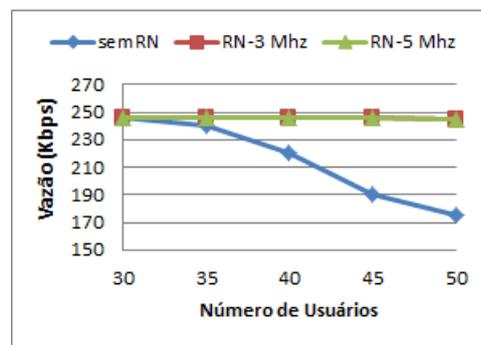


5.5(b):

Figura 5.5: Perda de pacotes no experimento 2. 5.5(a) médio da rede; 5.5(b) usuário na borda da célula.



5.6(a):



5.6(b):

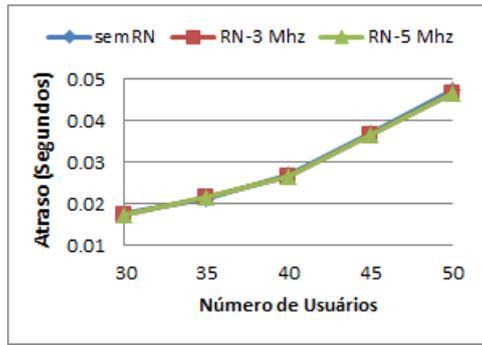
Figura 5.6: vazão obtida no experimento 2: 5.6(a) média da rede; 5.6(b) usuário na borda da célula.

5.1.3 Experimento 3

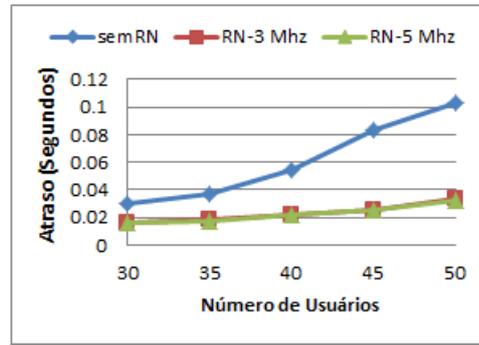
Neste experimento se introduz o uso de um RN localizado 40 metros antes da borda da célula. O objetivo é determinar o comportamento da rede e de um usuário localizado na borda da célula. Para todos os tamanhos da célula avaliados (260, 300, 340, 380, 420 m), foram simulados 40 usuários recebendo simultaneamente vídeo codificado a 256 kbps.

Nas figuras 5.8 e 5.9 observa-se um aumento da perda de pacotes e uma diminuição da vazão à medida que a célula apresenta raios maiores. Especificamente na figura 5.8(a) observa-se que sem a utilização do RN a média de perda de pacotes permanece abaixo do 1% para raios menores de 340 metros, mas para valores maiores como o caso do 420 metros esta valor ascende até 3%.

Ao contrário dos valores médios obtidos, o desempenho do usuário estático localizado na borda da célula (figuras 5.8(b) e 5.9(b)) decresce notoriamente passando do 5% para o raio de 300 metros e para 15% quando



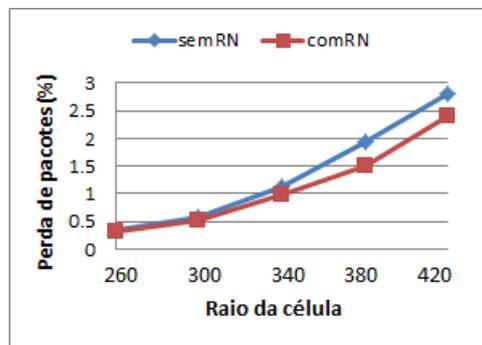
5.7(a):



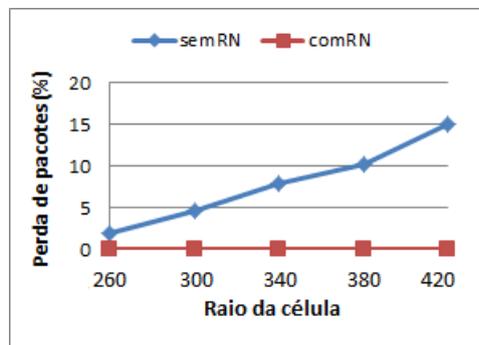
5.7(b):

Figura 5.7: Atraso médio na entrega de pacotes no experimento 2: 5.7(a) médio da rede e 5.7(b) usuário na borda da célula.

o raio é de 420 metros. Neste caso, o aporte do RN é maior dado que este consegue manter a perda de pacotes do usuário num valor perto de zero e consequentemente a vazão permanece no valor máximo. Isto se explica porque o enlace entre o RN e a eNB apresenta menores perdas da sinal, conseguindo manter uma SINR adequada que permite o uso dos esquemas de modulação mais eficientes. Além disso, dado que o RN reporta para o eNB valores altos de CQI, o agendador lhe dá prioridade no momento de distribuir os recursos disponíveis.



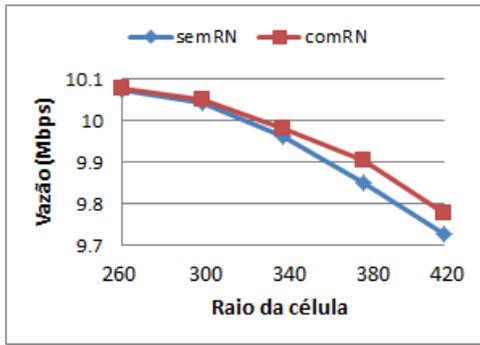
5.8(a):



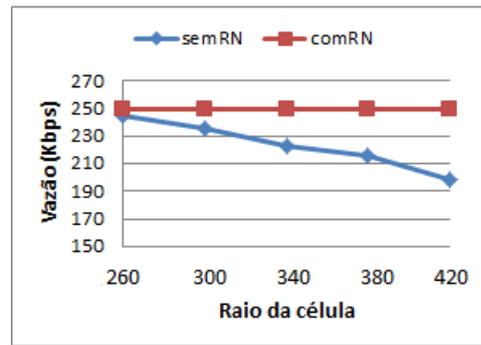
5.8(b):

Figura 5.8: Perda de pacotes do experimento 3. 5.8(a) médio da rede e 5.8(b) usuário na borda da célula.

A figura 5.10 mostra os valores de atraso médio obtidos para todos os usuários da célula (fig. 5.10(a)) e para o usuário próximo da borda (fig. 5.10(b)). Pode-se observar que o atraso aumenta à medida que cresce o tamanho da célula devido a existir uma maior probabilidade de haver usuários afastados da eNB que utilizam modulações com menores taxas de transmissão, recebendo por tanto menor prioridade na alocação de recursos por parte do agendador.



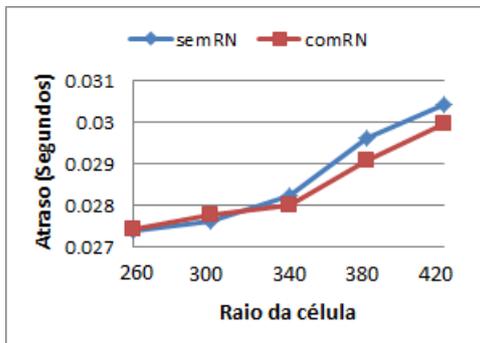
5.9(a):



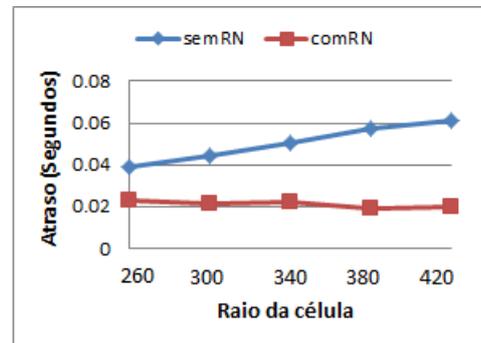
5.9(b):

Figura 5.9: Vazão do experimento 3. 5.9(a) média da rede e 5.9(b) usuário na borda da célula.

Os valores observados na figura 5.10 correspondentes ao atraso médio sem a utilização do RN não são prejudiciais para as aplicações de vídeo em tempo real, dado que estes são menores que 100 ms. Ao incluir o uso do RN, apesar de este somar um retardo por causa do processamento adicional da informação, diminui o atraso médio tanto na média geral quanto para o usuário da borda da célula, o qual consegue manter o atraso em torno dos 20 ms.



5.10(a):



5.10(b):

Figura 5.10: Atraso médio na entrega de pacotes no experimento 3. 5.10(a) média da rede e 5.10(b) usuário na borda da célula.

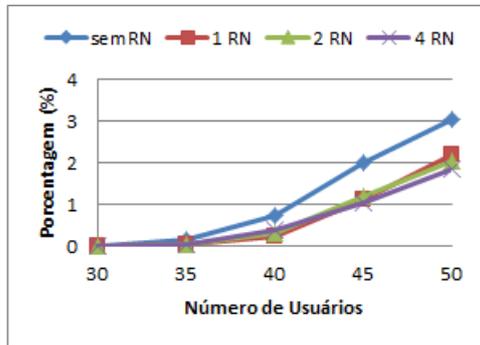
5.1.4 Experimento 4

Neste experimento procura-se avaliar o desempenho médio de todos os usuários, e daqueles que se encontram na borda da célula quando são introduzidos 1, 2 e 4 RNs.

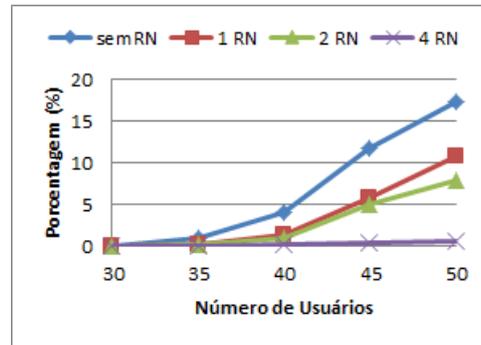
Nas figuras 5.12(a) e 5.11(b) pode-se observar que o aumento do número de RNs diminui a perda de pacotes tanto na média de todos os usuários da célula quanto o valor médio para aqueles localizados na borda. Estes últimos

resultaram os mais beneficiados dado que no caso “sem RN” apresentavam os menores valores de SINR, pelo qual recebiam a menor prioridade na alocação de recursos por parte do agendador.

Como consequência do resultado anterior se aprecia nas figuras 5.13(a) e 5.11(b) uma melhoria da vazão em ambos casos, conseguindo manter uma boa qualidade de transmissão para todos os usuários da célula.

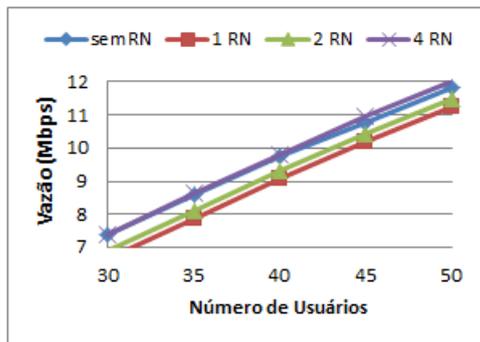


5.11(a):

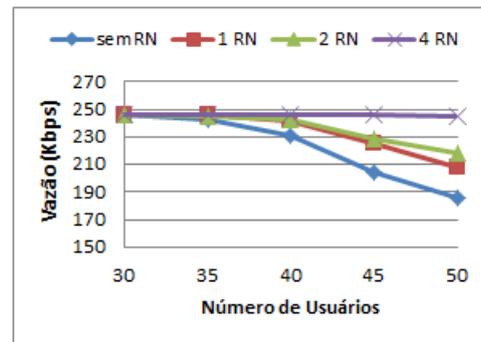


5.11(b):

Figura 5.11: Perda de pacotes no experimento 4. 5.11(a) médio da rede e 5.11(b) usuário na borda da célula.



5.12(a):

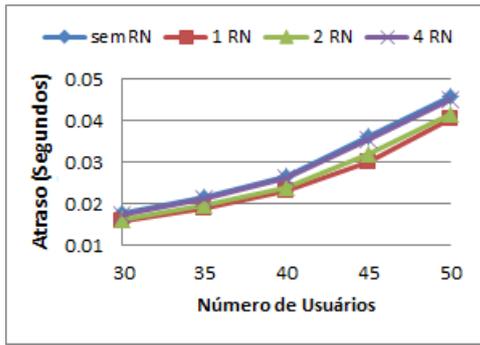


5.12(b):

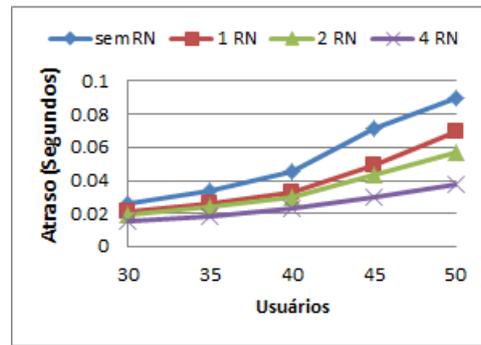
Figura 5.12: Vazão no experimento 4. 5.12(a) médio da rede e 5.12(b) usuário na borda da célula.

Na figura 5.12(a) se observa que a inclusão dos RN melhora levemente (em torno de 5 ms) os valores do atraso médio geral, porém, com o aumento do número de RN estes valores vão se aproximando aos valores obtidos no caso sem RN. Isto acontece porque existe uma maior quantidade de RNs competindo pelos recursos.

Para o caso dos usuários na borda da célula, os valores de atraso médio ilustrados na figura 5.12(b) diminuem à medida que todos eles são atendidos por um RN obtendo de esta forma melhores condições de canal, maiores prioridades na alocação de recursos e uso de esquemas de modulação mais eficientes.



5.13(a):



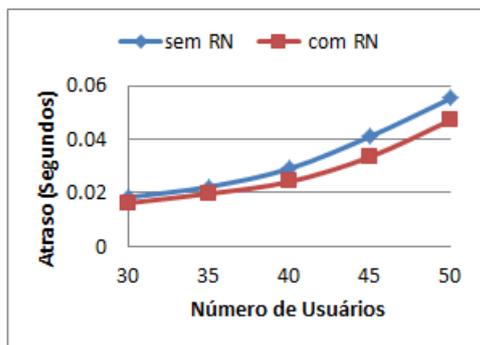
5.13(b):

Figura 5.13: Atraso médio na entrega de pacotes no experimento 4: 5.13(a) média da rede; 5.13(b) usuário na borda da célula.

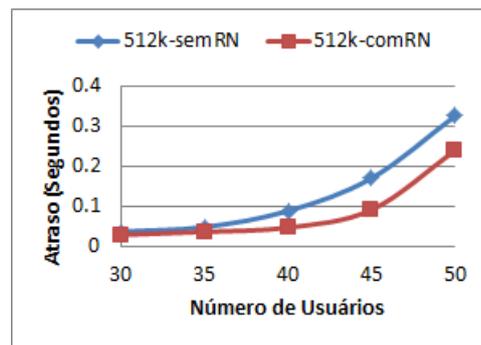
5.1.5 Experimento 5

Neste experimento avalia-se o desempenho do UE na borda da célula quando este recebe vídeo codificado a 512 kbps enquanto um número variável de UEs recebem vídeo codificado a 256 kbps.

Na figura 5.14 se apresenta a) o atraso médio introduzido pelo E-UTRA e b) o atraso médio experimentado pelo UE próximo da borda da célula. Pode-se apreciar que o UE da borda, sem o uso do RN, apresenta valores de atraso na recepção dos pacotes de 100 ms quando a célula contém 40 terminais ativos e de 300 ms quando o número de terminais acende a 50, enquanto que estes valores diminuem para 40 ms e 220 ms respectivamente com o uso do RN.



5.14(a):

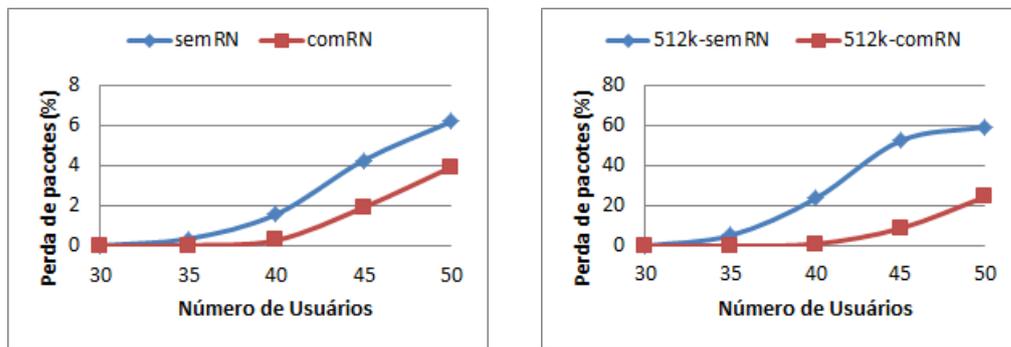


5.14(b):

Figura 5.14: Atraso médio na entrega de pacotes no experimento 5: 5.14(a) médio da rede e 5.14(b) usuário na borda da célula.

Na figura 5.15 é apresentada a relação entre a porcentagem de perda de pacotes e o número de usuários recebendo vídeo simultaneamente. No caso do usuário localizado na borda da célula (figura 5.15(b)), pode-se observar como mediante o uso do RN consegue-se manter a perda de pacotes abaixo

do 1% para um número inferior a 40 UEs. No entanto, para uma quantidade maior de terminais este valor cresce, alcançando 20% para 50 UEs recebendo vídeo simultaneamente. Este resultado se deve ao fato que o RN melhora as condições do canal para o UE da borda da célula, resultando em melhores valores da métrica calculada pelo agendador para a designação de recursos. Dado que para 40 UE ainda existem recursos disponíveis, o sistema consegue entregar a taxa requerida de 512 kbps para o UE da borda da célula, como se observa na figura 5.16. Para o caso em que a célula tem mais de 40 UE, existe uma limitação dos recursos disponíveis, e dado que o UE da borda se encontra recebendo uma taxa maior que os outros UE, o agendador de tipo PF ao considerar a taxa de bits média obtida pelo UE, faz um compartilhamento justo dos recursos, resultando numa menor alocação do meio para este UE e consequentemente perda de pacotes e diminuição na vazão obtida.



5.15(a):

5.15(b):

Figura 5.15: Perda de pacotes no experimento 5. 5.15(a) média da rede e 5.15(b) usuário na borda da célula.

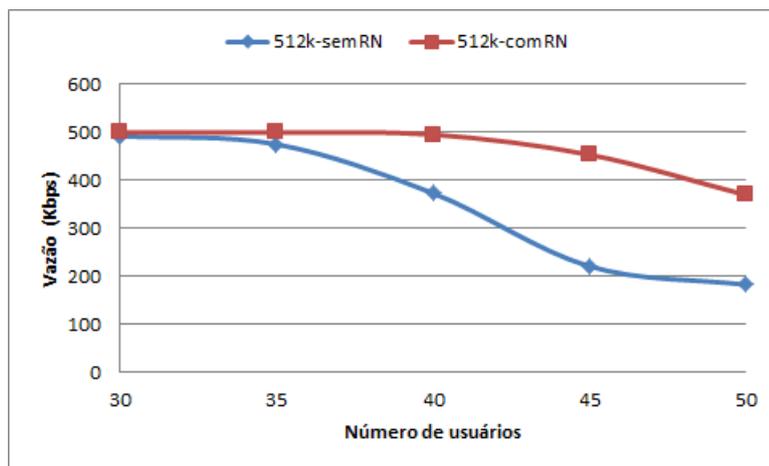


Figura 5.16: vazão obtida pelo usuário próximo da borda da célula no experimento 5

Como observação final deste experimento, das figuras 5.15(b) e 5.16

pode-se notar que o uso do RN permite acomodar aproximadamente mais 10 usuários, ao ser comparado com o desempenho do usuário da borda da célula para o caso sem o RN.

5.2

Análise das Métricas de QoE

Nesta seção se apresentam os resultados obtidos para as métricas associadas à qualidade da experiência. Esta análise foi feita mediante o uso da métrica objetiva PSNR, utilizada para descrever a distorção visual causada pela perda de pacotes, definindo a relação entre a máxima energia possível e o ruído que afeta a representação da sinal, entre os quadros de vídeo original e do vídeo recebido (degradado pela perda de possível perda de pacotes).

Posteriormente, conforme com a tabela 5.1 recomendada em [42], os valores obtidos para a PSNR foram mapeados para o MOS, métrica que descreve de forma quantitativa a opinião subjetiva do usuário sobre a qualidade do vídeo avaliado.

Esta relação entre o PSNR e MOS, foi representada para cada experimento através de gráficos com duas escalas laterais (figuras 5.17, 5.19 e 5.21), onde o eixo da esquerda representa o PSNR e eixo da direita representa os intervalos do MOS equivalente.

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

Tabela 5.1: Mapeamento do PSNR para o MOS

Os resultados da QoE são apresentados apenas para os experimentos 1,3 e 5. Devido ao concluído na sessão 5.1.2 (resultados similares para as duas larguras de banda avaliadas), os resultados de QoE do experimento 2 podem deduzidos a partir dos análises dos experimentos 1 e 3 quando o usuário encontra-se localizado a 285 metros da eNB.

5.2.1

Experimento 1

Os parâmetros de QoE foram avaliados apenas para o usuário de interesse em cada uma das posições definidas. Na figura 5.17 ilustra-se a relação entre

a PSNR média que experimenta o UE avaliado e a quantidade de UEs que se encontram recebendo vídeo simultaneamente na célula.

Os resultados mostram a degradação da qualidade do vídeo à medida que aumenta o tráfego na célula, sendo maior para o UE mais distante da eNB. Estes valores tem uma relação direta com a perda de pacotes apresentados na figura 5.1(b).

A partir dos valores médios de PSNR para os casos analisados, através da tabela 5.1, se obtiveram os valores de MOS que descrevem a qualidade do vídeo recebido em termos da qualidade percebida. Desta forma pode-se observar (figura 5.17) como para os casos nos quais o UE se encontra a 50 e 120 metros da eNB, a qualidade do vídeo é razoável apesar de existir congestionamento na célula, enquanto que para as distâncias de 200 e 285 metros, a partir de 45 UEs ativos, o vídeo recebido apresenta uma qualidade pobre.

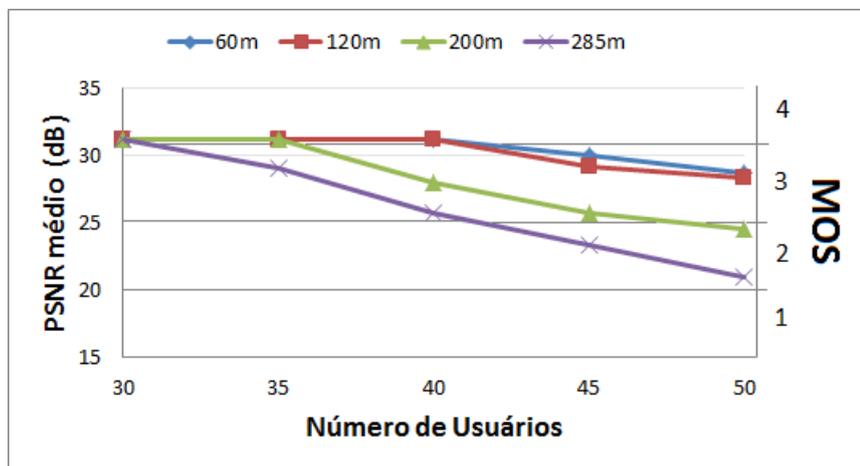


Figura 5.17: PSNR média e MOS equivalente para o experimento 1

Na figura 5.18 se apresenta de forma detalhada a porcentagem de quadros de vídeo recebidos com um determinado MOS quando os recursos da célula são compartilhados entre 45 usuários. Nesta figura, a primeira coluna que corresponde ao vídeo de referência representa o vídeo a ser transmitido na qual pode-se observar a degradação causada pelo esquema de codificação resultando um vídeo com o 52% e 41.9% dos quadros com um MOS bom e razoável, respectivamente. As colunas seguintes representam o vídeo recebido nas posições avaliadas e pode-se observar como à medida que o UE se afasta da eNB a qualidade dos quadros que compõem o vídeo decrescem, obtendo como resultado para o UE localizado a 285 metros um incremento na porcentagem dos quadros com um MOS ruim para 29.83% e uma diminuição da porcentagem de quadros com um MOS bom para 18.22%.

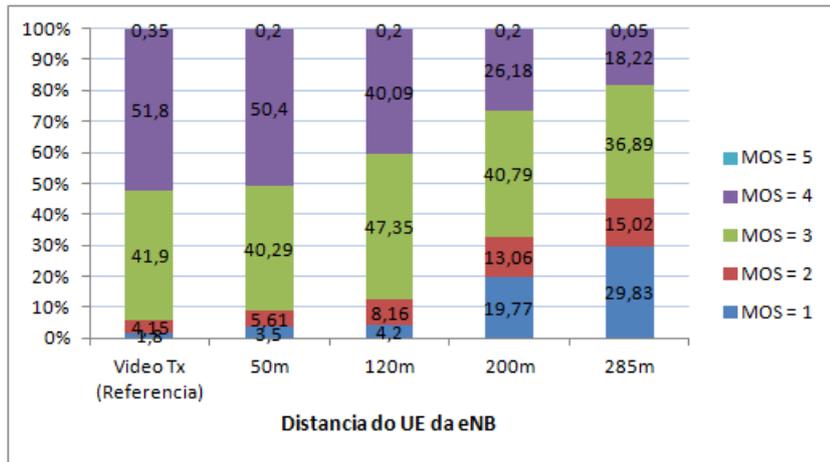


Figura 5.18: Valores de MOS para diferentes distâncias do UE da eNB no experimento 1

5.2.2 Experimento 3

Neste experimento, para cada raio de célula avaliado, na figura 5.19 ilustra-se o MOS e a PSNR médios do vídeo recebido no UE quando localizado a 15 metros da borda. Pode-se observar nos cenários sem RN que à medida que aumenta o raio da célula o desempenho do vídeo diminui, enquanto que com o uso do RN a PSNR média mantém-se num valor constante de 31.17 dB, equivalente à qualidade do vídeo transmitido.

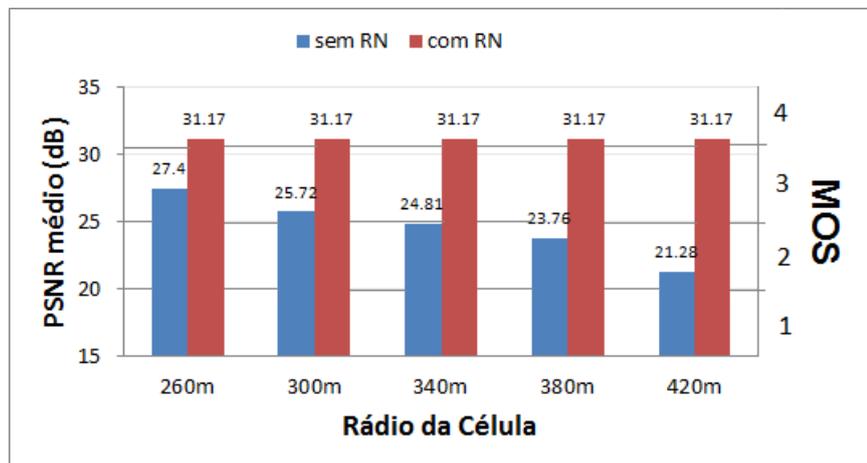


Figura 5.19: PSNR média e MOS equivalente para o experimento 3

Na figura 5.20 são apresentadas de forma detalhada as porcentagens de quadros com um determinado valor de MOS, neste caso, sem o uso do RN, para um raio de célula de 260 metros e um UE localizado a 245 metros da eNB, a quantidade de quadros com MOS bom decresce do 52.1% para o 29.78% conservando a maioria de quadros numa qualidade razoável. Já para uma célula

de raio igual a 420 metros e um UE localizado a 405 metros da eNB, existe uma degradação mais forte da qualidade dos quadros, resultando que em 49.45% deles o um MOS é ruim e consequentemente em uma qualidade de vídeo pobre.

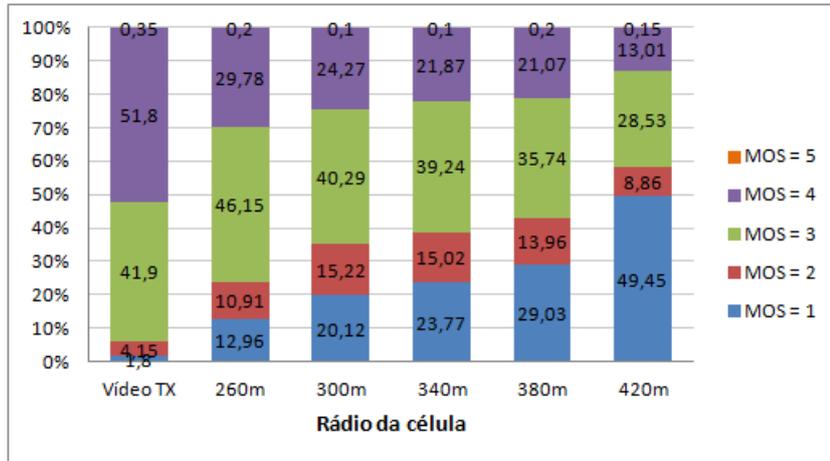


Figura 5.20: Valores de MOS para diferentes tamanhos de célula no experimento 3

5.2.3 Experimento 5

Na figura 5.21 ilustra-se para os cenários com e sem RN, a PSNR média e o MOS equivalente obtido pelo UE próximo da borda da célula quando este recebe tráfego de vídeo codificado a 512 kbps enquanto que os UE restantes recebem vídeo codificado a 256 kbps. O fato de que o UE da borda receba uma taxa de transmissão maior que os demais UEs causa uma perda de qualidade maior à medida que o número de terminais ativos na célula incrementa, sendo esta queda mais acentuada para o caso “sem RN”.

Ao contrario dos resultados obtidos nos experimentos anteriores, neste experimento o uso do RN não consegue manter o desempenho no seu maior valor a partir dos 40 UE. Isto acontece porque o agendador, de tipo PF, faz um compartilhamento justo dos recursos dando maior prioridade a aqueles terminais que transmitiram uma menor quantidade de dados, resultando em uma diminuição na qualidade do vídeo percebida para o UE da borda na célula, à medida que incrementa o número de UEs.

Nas figuras 5.22 e 5.23 ilustra-se detalhadamente a porcentagem de quadros do vídeo recebido com um determinado MOS sem e com o uso do RN. Pode-se notar que sem o uso do RN a qualidade do vídeo decresce rapidamente com o incremento do número de UEs na célula, já para 50 UEs, o vídeo observado pelo terminal próximo da borda da célula apresenta uma qualidade

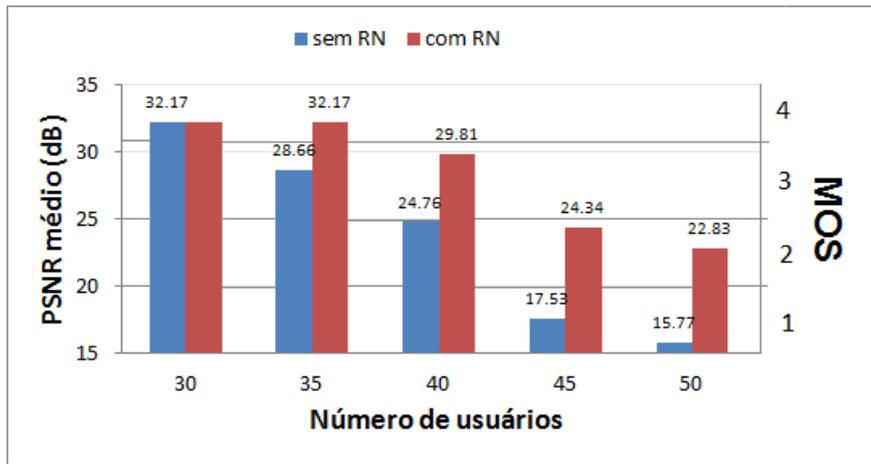


Figura 5.21: PSNR média e MOS equivalente para o experimento 5

ruim, com 59.11% dos quadros com MOS ruim e apenas o 2.53% dos quadros com MOS bom.

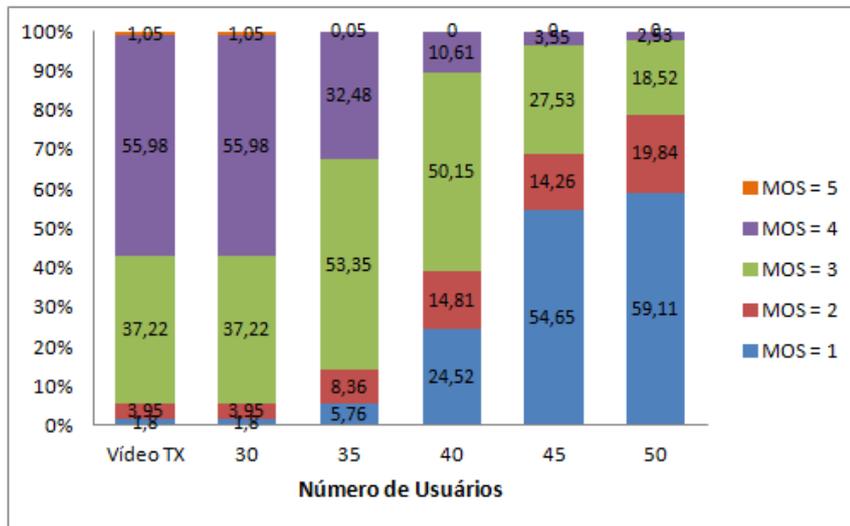


Figura 5.22: Valores de MOS obtidos pelo UE da borda da célula sem o uso do RN no experimento 5

Para este experimento, com o uso do RN, pode-se observar que o vídeo recebido conserva a mesma qualidade do vídeo transmitido até a existência de 35 terminais ativos, apresentando 55.98% dos quadros com MOS bom e ainda 37.22% dos quadros com MOS razoável. Já para um número maior de UEs existe uma degradação em relação ao vídeo transmitido, sendo que no caso de 50 UEs a porcentagem de quadros com MOS bom é reduzida a 8.02% e número de quadros com MOS ruim aumenta para 24.75%.

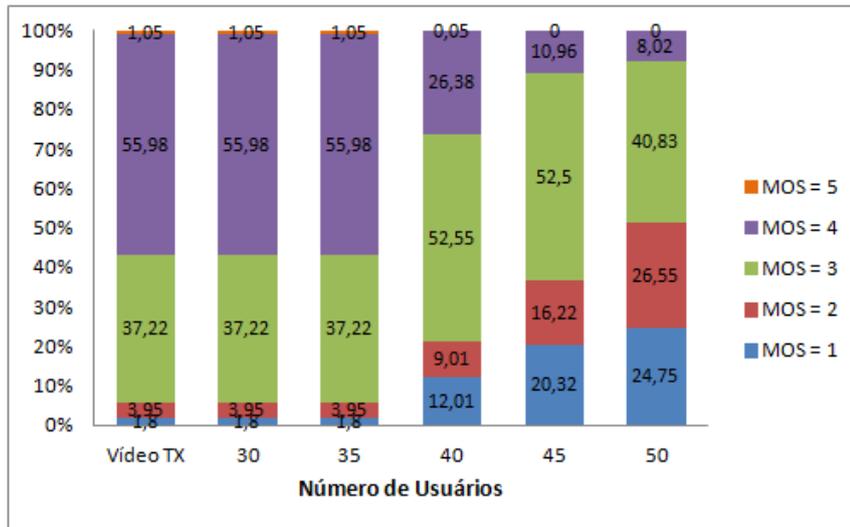


Figura 5.23: Valores de MOS obtidos pelo UE da borda da célula com o uso do RN no experimento 5

5.3 Observações finais

Nos experimentos avaliados anteriormente conseguiu-se avaliar o desempenho de vídeo no enlace descendente na tecnologia LTE para diversas condições e cenários. Foi possível observar como a partir de um número de usuários a perda de pacotes aumenta significativamente impactando negativamente a qualidade de experiência dos usuários. Como extensão dos resultados obtidos no experimento 1, na figura 5.24 se apresentam algumas imagens significativas dos vídeos recebidos por usuários localizados a diferentes distâncias (60, 120, 200 e 285 metros) da eNB num cenário com 45 terminais que recebem um fluxo de vídeo de resolução CIF 352x288 e taxa de codificação H.264/AVC de 256 kbps. Nesta figura pode-se observar como a degradação do vídeo recebido é maior à medida que o usuário se afasta da eNB, e como mediante o uso do RN (figura 5.24(e)) é possível melhorar o desempenho do usuário da borda na célula.

No capítulo seguinte serão apresentadas as conclusões e indicações sobre possíveis trabalhos futuros que poderão ser realizados a partir deste trabalho.



5.24(a):



5.24(b):



5.24(c):



5.24(d):



5.24(e):

Figura 5.24: Imagens significativas do vídeo recebido pelos usuários a: 5.24(a) 60 metros da eNB, 5.24(b) 120 metros da eNB. 5.24(c) 200 metros da eNB. 5.24(d) 285 metros da eNB. 5.24(e) 285 metros da eNB suportado pelo RN.

6

Conclusão

Esta dissertação teve como objetivo principal avaliar o desempenho de aplicações de vídeo em tempo real, focando a atenção nos usuários da borda da célula, explorando possíveis melhoras que podem ser obtidas com o uso de *Relay Nodes* de tipo 1a.

Para atingir este objetivo foi realizada uma análise comparativa sem e com o uso de RN em diferentes cenários de simulação. Para isto, devido a inexistência de simuladores de acesso público que permitam a simulação dos cenários propostos, foram desenvolvidas classes no código aberto do simulador LTE-Sim para a inclusão de RN (conforme as especificações da 3gpp). Adicionalmente, desenvolveu-se uma interface entre o LTE-Sim e o programa Evalvid com a finalidade de utilizar tráfego de vídeo real nas simulações e avaliar o desempenho a partir de métricas relacionadas com a qualidade da experiência do usuário final.

Através de 5 cinco experimentos de simulação foram evidenciadas as vantagens do uso de RN em redes LTE e sua contribuição para os usuários da borda da célula na diminuição de perda de pacotes, aumento da vazão e por conseguinte melhoras na qualidade percebida das aplicações multimídia.

Os resultados nos experimentos sem o uso do RN mostraram que uma célula LTE com largura de banda de 10 Mhz e raio de 300 m, consegue atender 40 usuários recebendo vídeo simultaneamente com codificação a 256 kb/s e uma taxa de perda de pacotes média na célula inferior a 1%, enquanto que, um o terminal da borda da célula experimentou um valor de perda de pacotes de 5%. Para 50 usuários, estes valores aumentaram para 4.6% e para 15.2% respectivamente. Este resultado mostra que o usuário da borda da célula sofre um aumento na perda de pacotes superior à média da rede na medida em que o número de usuários aumenta, resultando em uma qualidade do vídeo pobre.

Já nos experimentos com uso do RN, foi observada uma diminuição na perda de pacotes tanto na média da rede quanto no terminal da borda e por conseguinte um aumento na qualidade do vídeo recebido, comprovando desta forma a efetividade do RN para melhorar o serviço na borda da célula.

Através das simulações realizadas, comprovou-se a relação entre o ta-

manho da célula e a necessidade do uso de nós de retransmissão. Segundo os resultados obtidos, para um número de 40 usuários ativos simultaneamente (recebendo vídeo a 256 Kbps) e células com um raio igual ou inferior a 260 metros, o uso do RN não aporta ganhos significativos em relação ao cenário sem RN, enquanto que para raios maiores, o ganho na perda de pacotes para o usuário da borda da célula é de 4.9%, 8.7% e 15% para os raios de 300, 360 e 420 metros respectivamente.

Como o emprego de RN melhora as condições do canal para os usuários da borda da célula, pode-se concluir que as melhoras introduzidas pelos RN no enlace descendente decorrem da melhoria dos níveis de SNR percebidos pelos usuários que por sua vez permitem uma melhora no desempenho através da estratégia de agendamento de pacotes (*packet scheduling*) e a designação de esquemas de modulação/codificação adaptativos, ambas localizadas na eNB.

Em relação à estratégia de agendamento de pacotes, dado que a comunicação entre a eNB e o UE é realizada através do RN, os valores das mensagens de estado de canal (CQI) são informados pelo RN, resultando em valores superiores dos parâmetros empregados para a alocação de recursos, de tal forma, os dados enviados para o terminal da borda da célula recebem maior prioridade ao ser designados os blocos de recursos, e por conseguinte sofrem menor perda de pacotes e menores atrasos. Da mesma forma, em relação às técnicas de modulação adaptativa, dadas as melhoras nos níveis de SNR nos enlaces rádio, é possível utilizar esquemas de modulação mais eficientes (p.e. 64 QAM), resultando em uma maior taxa de transmissão.

Pelo que foi apresentado nesta dissertação, pode-se afirmar que os RN terão um papel fundamental na evolução dos serviços de vídeo em *LTE-Advanced*, devido a suas funcionalidades que permitem realizar uma distribuição mais uniforme dos recursos da célula entre todos os usuários, melhorando as condições do canal para os terminais na borda da célula.

6.1

Trabalhos Futuros

A partir da análise realizada durante cada experimento, surgiram alguns temas para ser trabalhados em pesquisas futuras.

Conforme ao explicado na seção 4.2.3, referente às limitações do modelo de simulação, propõe-se implementar os métodos de multiplexação e mapeamento de portadoras de usuário em portadoras de RN, permitindo criar cenários com um número maior de UE por RN. Da mesma forma, sugere-se implementar os mecanismos necessários para integrar os RN de tipo 1 (*In-band*) na ferramenta de simulação e realizar uma comparação do desempenho obtido

por cada modo de operação (*Out-band* e *In-band*).

Por outro lado, os cenários analisados neste trabalho consideraram uma célula com um número variável de usuários sem a ocorrência de interferências causadas por eNB ou RN vizinhos, por isto, propõe-se estender o modelo, considerando cenários multi-célula e com múltiplos RN, para avaliar os efeitos das possíveis interferências e seu impacto no funcionamento do sistema.

Nas simulações realizadas, a alocação de recursos no enlace descendente tanto na eNB quanto no RN é feita através do algoritmo *Proportional Fair* (PF). Como uma extensão do trabalho propõe-se avaliar o desempenho obtido por diferentes estratégias (algoritmos) de agendamento de pacotes num cenário que integre RNs e diversas classes de tráfego na célula.

7

Referências Bibliográficas

- [1] CISCO. Cisco Visual Networking Index; Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2011-2016. Technical report, 2012. 1.1
- [2] IEEE 802.16 WORKING GROUP et al. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. IEEE Std, v. 802, p. 16-2004, 2004. 1.1
- [3] 3GPP. LTE Homepage with specifications: <http://www.3gpp.org/LTE>. 1.1
- [4] HIRAMATSU, K. et al. Technology evolutions in LTE/LTE-advanced and its applications. In: Communication Systems (ICCS), 2010 IEEE International Conference on. IEEE, 2010. p. 161-165. 1.1
- [5] YANG, Yang et al. Relay technologies for WiMAX and LTE-advanced mobile systems. Communications Magazine, IEEE, v. 47, n. 10, p. 100-105, 2009. 1.1, 1.2
- [6] ITU-T RECOMMENDATION, P. Subjective video quality assessment methods for multimedia applications. 1999. 1.1
- [7] OYMAN, Ozgur et al. Toward enhanced mobile video services over WiMAX and LTE [WiMAX/LTE update]. Communications Magazine, IEEE, v. 48, n. 8, p. 68-76, 2010. 1.2
- [8] TALUKDAR, Anup; CUDAK, Mark; GHOSH, Amitava. Streaming video capacities of LTE air-interface. In: Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on. IEEE, 2010. p. 1-5. 1.2, 5.1.1
- [9] TALUKDAR, Anup et al. Streaming Video Capacity Comparisons of Multi-Antenna LTE Systems. In: Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring), 2010 IEEE 71st. IEEE, 2010. p. 1-5. 1.2
- [10] MCDONAGH, Patrick et al. Investigation of scalable video delivery using H. 264 SVC on an LTE network. In: Wireless Personal Multimedia Com-

- munications (WPMC), 2011 14th International Symposium on. IEEE, 2011. p. 1-5. 1.2
- [11] PANDE, Amit; RAMAMURTHI, Vishwanath; MOHAPATRA, Prasant. Quality-oriented Video delivery over LTE using Adaptive Modulation and Coding. In: Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), 2011 IEEE. IEEE, 2011. p. 1-5. 1.2
- [12] WANG, Dandan et al. Video telephony over downlink LTE systems with/without QoS provisioning. In: Sarnoff Symposium, 2011 34th IEEE. IEEE, 2011. p. 1-5. 1.2
- [13] MINELLI, Mattia et al. Relays-enhanced LTE-Advanced networks performance studies. In: Sarnoff Symposium, 2011 34th IEEE. IEEE, 2011. p. 1-5. 1.2
- [14] LIEBL, Guenther et al. Fair resource allocation for the relay backhaul link in LTE-Advanced. In: Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012 IEEE. IEEE, 2012. p. 1196-1201. 1.2
- [15] PIRO, Giuseppe et al. Simulating LTE cellular systems: an open-source framework. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, v. 60, n. 2, p. 498-513, 2011. 1.3, 4.1.3, 4.1
- [16] 3GPP TR36.806 V9.0.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Relay Architectures for E-UTRA (LTE-Advanced). Technical report, 2010. 1.3, 4.2.3, 4.7
- [17] 3GPP TR 36.814. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9). Technical Report Release 9, 2010. 1.3, 3.2.2, 4.2.1, 4.3.2
- [18] KLAUE, Jirka; RATHKE, Berthold; WOLISZ, Adam. Evalvid?A framework for video transmission and quality evaluation. In: Computer Performance Evaluation. Modelling Techniques and Tools. Springer Berlin Heidelberg, 2003. p. 255-272. 1.3, 4.1.4, 4.3
- [19] ITU-R M.2134. Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s). Technical report. 2, 2.5
- [20] 3GPP TR 25913. Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN). Technical Report Release 9, Third Generation Partnership Project, 2009. 2.1

- [21] 4G Americas. LTE: Long Term Evolution; disponível em: <http://www.4gamericas.org/index.cfm?fuseaction=page§ionid=249>. 2.1
- [22] FURUSKAR, Anders; JONSSON, Tomas; LUNDEVALL, Magnus. The LTE radio interface-key characteristics and performance. In: Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. IEEE 19th International Symposium on. IEEE, 2008. p. 1-5. 2.1
- [23] 3GPP TS36.300. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2. Technical report. 2.2.1
- [24] 3GPP TS36.401. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Architecture description. 2.2.1
- [25] 3GPP TS 23.401. General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access. Technical report. 2.2.2
- [26] 3GPP TS 23.402. Architecture enhancements for non-3GPP accesses. Technical report. 2.2.2
- [27] 3GPP TS36.323 V9.0.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification. Technical report, 2009. 2.3, 3.3.2
- [28] 3GPP TS36.322 V9.1.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Link Control (RLC) specification. Technical report, 2010. 2.3, 3.3.2
- [29] 3GPP TS36.331 V9.2.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) Protocol specification. 2010. 2.3, 3.3.2
- [30] C Gessner. UMTS Long Term Evolution (LTE) technology introduction. *Rohde and Schwarz Tech. Report. Disponível em: http://karriere.rohde-schwarz.de/fileadmin/customer/downloads/PDF/UMTS_Eng.pdf*, pages 1–32, 2008. 2.4.1, 2.9
- [31] 3GPP TS36.913. Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced). Technical report, 2008. 2.5

- [32] DAHLMAN, Erik; PARKVALL, Stefan; SKOLD, Johan. 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband. Academic Press, 2011. 3.1, 3.6, 3.9
- [33] IWAMURA, Mikio; TAKAHASHI, Hideaki; NAGATA, Satoshi. Relay technology in LTE-Advanced. NTT DoCoMo Technical Journal, v. 12, n. 2, p. 29-36, 2010. 3.3, 3.4, 3.5, 3.10
- [34] Gang Shen, Kaibin Zhang, Dongyao Wang, Jimin Liu, Xiaobing Leng, Wei Wang, and Shan Jin. Multi-hop relay operation modes. *Alcatel Shanghai Bell, IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group*, pages 1–5, 2008. 3.2.3
- [35] 3GPP TS36.331 V9.2.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC) Protocol specification. Technical report, 2010. 3.3.2
- [36] IETF. Robust Header Compression (ROHC): Framework and Four Profiles: RTP, UDP, ESP, and uncompressed. 4.1.3
- [37] 3GPP TS 36.211. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 8.7.0 Release 8). Technical report, 2009. 4.1.3
- [38] 3GPP TR 36.806. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Relay architectures for E-UTRA (LTE-Advanced). Technical Report Release 9, 2010. 4.2.1
- [39] CAMP, Tracy; BOLENG, Jeff; DAVIES, Vanessa. A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless communications and mobile computing*, v. 2, n. 5, p. 483-502, 2002. 4.3.1
- [40] Arizona State University. YUV Video Sequences, disponível em <http://trace.eas.asu.edu/yuv/index.html>. 4.3.3
- [41] RECOMMENDATION, ITURBT. 500-11, Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures. International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, 2002. 4.4.2
- [42] OHM, Jens-Rainer. Bildsignalverarbeitung fuer multimedia-systeme. Skript, Institut für Nachrichtentechnik und theoretische Elektrotechnik der TU Berlin, 1999. 5.2