



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Igor da Penha Natal

**Estratégia para Avaliação de Desempenho de Aplicações
Multimídia em Redes LTE Utilizando Métricas de QoE**

Belém – Pará

2015

IGOR DA PENHA NATAL

**Estratégia para Avaliação de Desempenho de Aplicações Multimídia
em Redes LTE Utilizando Métricas de QoE**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em
Ciência da Computação da Universidade Federal
do Pará como requisito a obtenção do título de
Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês

Belém – Pará

2015

IGOR DA PENHA NATAL

Estratégia para Avaliação de Desempenho de Aplicações Multimídia em Redes LTE Utilizando Métricas de QoE

Dissertação de Mestrado submetida à avaliação da banca examinadora aprovada pelo colegiado do programa de pós-graduação em ciência da computação da Universidade Federal do Pará e julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação

Belém, 27 de Fevereiro de 2015.

Professor Dr. e Orientador Carlos Renato Lisboa Francês.
Universidade Federal do Pará (PPGCC)

Professor Dr. Diego Lisboa Cardoso
Universidade Federal do Pará (ITEC)

Professor Dr. Josivaldo de Souza Araújo
Universidade Federal do Pará (PPGCC)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me abençoar com mais essa conquista em minha vida e me dar sabedoria e forças para sempre seguir adiante.

A minha família que sempre teve um papel fundamental em minha vida me apoiando e incentivando em todos os momentos, principalmente meus pais Conceição e Natal.

A minha noiva Isana pelo amor, apoio, paciência e companheirismo durante todo os momentos deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Carlos Renato Francês, pelo acolhimento e ensinamentos durante o mestrado, por acreditar no meu potencial e ser um grande exemplo a ser seguido. Obrigado pela orientação deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Diego Cardoso, pelas ideias e conhecimentos repassados para que fosse possível a realização deste trabalho, assim como correções em artigos e conversas informais e formais sempre buscando obter os melhores resultados.

Agradeço ao Prof. José Jailton por repassar seus conhecimentos de simulação e pela disponibilidade para tirar dúvidas e conseguir consolidar resultados para os trabalhos realizados.

Agradeço aos meus amigos de LPRAD. Em especial ao Jorge, Delson, Marcelino, La-Roque, Ketyllen, Priscila, Tássio, Ulysses e Eulália, pela amizade e boa convivência.

Agradeço aos companheiros das madrugadas de estudos das disciplinas do PPGCC, Eduardo, Anderson e Franciel, e também aos professores vinculados ao PPGCC pelos ensinamentos que contribuíram diretamente para a minha formação.

Agradeço a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro.

E por fim agradeço a UFPA (Universidade Federal do Pará), pela oportunidade dada a mim para a realização deste mestrado.

“Acredite que você pode, assim você já está no meio do caminho”

Theodore Roosevelt

RESUMO

Com o avanço das tecnologias de redes sem fio e a utilização maciça de dispositivos móveis o perfil de acesso dos usuários vem se modificando e migrando cada vez mais para acesso a aplicações multimídia. Com isso, as estruturas existentes não conseguem suprir tais necessidades. Em se tratando de redes móveis, muitos estudos estão relacionados à implantação de *femtocells* como uma forma de melhorar a capacidade e a qualidade dos sistemas. As mudanças no perfil do usuário causam grandes impactos negativos, muitas vezes com serviços não satisfatórios para os clientes. Antes da implantação de sistemas é recomendável proceder-se uma avaliação de desempenho do mesmo, para que possa ser analisado o comportamento e verificar se sua implantação pode ser satisfatória ou não. Muitas estratégias para avaliação de desempenho em redes utilizam apenas métricas de QoS (*Quality of Service* – Qualidade de Serviço) que não são eficientes para analisar a percepção do usuário final em relação as aplicações multimídias. Com isso, métricas de QoE (*Quality of Experience* – Qualidade de Experiência) estão sendo utilizadas para este tipo de avaliação. O presente trabalho apresenta uma estratégia de avaliação de desempenho de aplicações multimídia a partir de métricas de QoE, utilizando PSNR, SSIM e VQM. A estratégia foi validada com o uso de simulação discreta utilizando o NS-2 (*Network Simulator - 2*) a partir de dois cenários com *femtocell* e *macrocell*. Os resultados foram coletados a partir de amostras, utilizando-se de 5 a 30 usuários (variando de 5 em 5), em cada cenário e foram classificados utilizando a estratégia aqui proposta. A partir dos resultados apresentados na simulação, o cenário com política apresentou melhores resultados de QoE, a métrica que apresentou resultados mais significativos foi a VQM (*Video Quality Metric*) chegando a ser 1937% melhor do que no *Macro/Femto*, além disso todos os vídeos foram aprovados pela estratégia nesse cenário.

Palavras – chave: QoE, QoS, *Markov*, *Femtocell*, *Macrocell*, Simulação.

ABSTRACT

With the advancement of wireless network technologies and the widespread use of mobile devices, the user access profile have changed and migrated increasingly to access multimedia applications. With this existing infrastructure cannot meet such needs. When it comes to mobile networks, many studies are related to the deployment of femtocells as a way to improve the capacity and quality of systems. The changes in the user profile cause great negative impacts, often with unsatisfactory services to customers. Before the implementation of systems, it is advisable to be a performance evaluation of the same, so that behavior can be analyzed and verify that its implementation can be satisfactory or not. Many strategies for network performance evaluation use only QoS (Quality of Service) metrics that are not efficient to analyze the perception of the end user in relation to multimedia applications. With this QoE (Quality of Experience) metrics are being used for this type of evaluation. This work presents a performance evaluation strategy of multimedia applications from QoE metrics using PSNR, SSIM and VQM. The strategy was validated using discrete simulation using NS-2 (Network Simulator - 2) from two scenarios with femtocell and macrocell. The results were obtained from samples, using 5 to 30 users (ranging from 5 of 5), in each scenario, and were classified using the strategy proposed here. From the results presented in the simulation scenario with policy showed a better QoE, the metric presented the most significant results was the VQM (Video Quality Metric) coming to be 1937% better than in Macro/Femto also all videos have been approved by the strategy in this scenario.

Keywords: QoE, QoS, Markov, Macrocell, Femtocell, Simulation.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3G	3ª Geração
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	4ª Geração
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
AP	<i>Access Point</i> – Ponto de Acesso
BS	<i>Base Station</i> – Estação Base
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CM	Cadeias de Markov
CO ₂	Dióxido de Carbono
EDGE	<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i>
eNodeBs	<i>enhanced NodeBs (Macrocells)</i>
ERB	Estações Rádio-Base
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System Mobile</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPTV	<i>Internet Protocol Television</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	<i>Long Term Evolution – Advanced</i>
MIH	<i>Media Independent Handover</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
MOS	<i>Mean Opinion Score</i>
MS	<i>Mobile Station</i> – Estação Móvel
NS-2	<i>Network Simulator 2</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
P-GW	<i>PDN Gateway</i>
PMD	Processo Markoviano de Decisão

PMDTC	Processo Markoviano de Decisão a Tempo Contínuo
PMDTD	Processo Markoviano de Decisão a Tempo Discreto
PSNR	<i>Peak Signal to Noise Ratio</i>
QoE	<i>Quality of Experience</i> – Qualidade de Experiência
QoS	<i>Quality of Service</i> – Qualidade de Serviço
S-GW	<i>Serving Gateway</i>
SIM	Simulação
SSIM	<i>Structural Similarity Index</i>
SVH	Sistema Visual Humano
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
VQEG	<i>Video Quality Experts Group</i>
VQM	<i>Video Quality Metric</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>

Sumário

1 - INTRODUÇÃO	14
1.1 Motivação	17
1.2 Objetivo Geral	18
1.3 Objetivos Específicos	18
1.4 Organização da Dissertação	18
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Considerações Iniciais	20
2.2 Redes móveis	20
2.2.1 LTE	21
2.2.2 <i>Femtocell</i>	25
2.3 Simulação	28
2.3.1 NS-2 (<i>Network Simulator - 2</i>)	29
2.3.2 NS-3 (<i>Network Simulator - 3</i>)	30
2.3.3 OPNET	31
2.3.4 MIH (<i>Media Independent Handover</i>)	31
2.3.5 QoS (Qualidade de Serviço)	33
2.3.6 QoE (Qualidade de Experiência)	34
2.3.6.1 Avaliação Subjetiva	34
2.3.6.2 Avaliação Objetiva	35
2.3.6.2.1 PSNR	35
2.3.6.2.2 SSIM	36
2.3.6.2.3 VQM	37
2.4 Considerações Finais	37
3 – TRABALHOS RELACIONADOS.....	39
3.1 Considerações Iniciais	39
3.2 Levantamento de Trabalhos Considerados Mais Relevantes	39
3.3 Considerações Finais	42
4 – ESTRATÉGIA PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE APLICAÇÕES MULTIMÍDIA EM REDES LTE UTILIZANDO MÉTRICAS DE QoE.....	44
4.1 Considerações Iniciais	44
4.2 Arquitetura da rede	44
4.3 Cenários	45
4.3.1 Parâmetros da Simulação	46
4.4 Política	47
4.6 Estratégia de Avaliação de Desempenho para Aplicações Multimídia	48

4.7 Considerações Finais	49
5 – RESULTADOS NUMÉRICOS	50
5.1 Considerações Iniciais	50
5.2 Resultados de QoE.....	50
5.3 Considerações Finais	54
6 – CONCLUSÃO.....	55
6.1 Considerações Finais	55
6.2 Contribuições da Dissertação	55
6.3 Trabalhos Futuros	56
6.4 Dificuldades Encontradas	56
6.5 Publicações	57
REFERÊNCIAS.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Arquitetura LTE	23
Figura 2: Cobertura das células de redes móveis.....	25
Figura 3: Cenário <i>femtocell</i>	26
Figura 4: Arquitetura da rede femtocell indoor	27
Figura 5: Arquitetura do módulo MIH.	32
Figura 6: Arquitetura da Rede.	44
Figura 7: Fluxograma da política.....	47
Figura 8: Chamadas bloqueadas no cenário com política.	51
Figura 9: Gráfico PSNR.....	52
Figura 10: Gráfico SSIM.	52
Figura 11: Gráfico VQM.	53
Figura 12: Qualidade dos Frames com 30 usuários.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características das principais tecnologias celular.....	21
Tabela 2: Características das tecnologias Femtocell e Wifi.....	27
Tabela 3: Principais métricas de QoS.....	33
Tabela 4: Escala de qualidade MOS.....	35
Tabela 5: Mapeamento PSNR para MOS.....	36
Tabela 6: Trabalhos Relacionados.....	41
Tabela 7: Cenários testados.....	46
Tabela 8: Parâmetros da Macrocell e Femtocell.....	46
Tabela 9: Parâmetros das aplicações de Voz e Dados.....	46
Tabela 10: Parâmetros de Vídeo.....	47
Tabela 11: Algoritmo Genérico da Política <i>Markoviana</i>	48
Tabela 12: Pseudocódigo da estratégia.....	49
Tabela 13: Resultados de QoE cenário Macro/Femto.....	50
Tabela 14: Resultado de QoE cenário com Política.....	51

1 - INTRODUÇÃO

Com o avanço das tecnologias de redes sem fio e o uso maciço de dispositivos que utilizam essa interface (*smartphones*, *tablets* e *notebooks*), surge à necessidade contínua de propor aprimoramentos que forneçam a adequada qualidade e cobertura possível para os usuários.

Atualmente, a implantação de sistemas celulares tem um custo elevado e ainda tem como grande problema a cobertura em ambientes *indoor*. Deste ambiente são originados mais de 50% das ligações que se utilizam da conexão sem fio e mais de 70% do tráfego de dados [CHANDRASEKHAR & ANDREWS, 2008]. A infraestrutura atual consegue ter um bom desempenho para atender à demanda de tráfego de voz, porém o perfil de utilização dos usuários está voltado para dados que precisam de maior largura de banda, como por exemplo, vídeos e músicas.

Segundo CISCO VISUAL NETWORKING INDEX (2014) o tráfego global IP (*Internet Protocol*) irá alcançar um marco de 7 Exabytes (10^{18} bytes) mensalmente até 2016. Além disso, haverá cerca de 3,4 bilhões de usuários (45% da população mundial projetada) e 19 bilhões de conexões globais de rede (fixas e móveis), o equivalente a mais de duas conexões para cada pessoa da terra. Entre as aplicações IP, as comunicações de vídeo (vídeo sob demanda, videoconferência, videovigilância, etc) terão demandas 14 vezes maiores do que a atual.

Para atender a demanda por altas taxas de dados algumas abordagens podem ser utilizadas. Entre as principais opções para expandir a capacidade da rede se inclui: melhorar o desempenho das eNodeBs (*enhanced NodeBs (Macrocells)*) e complementar a rede com nós de baixa potência, criando assim uma rede heterogênea. A utilização de nós de baixa potência servem como solução para complementar as *macrocells* para diminuir a carga e aumentar a área de cobertura das redes móveis [DAMNJANOVIC et al, 2011]. O 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) define uma variedade de nós de baixa potência (*picocell*, *femtocell*, etc) e suporte de recursos para permitir o aumento da capacidade das redes 4G [3GPP, 2010]. Tal tipo de nó serve para absorver parte do tráfego das *macrocells*, atuando principalmente em ambientes *indoor*. As *femtocells* surgiram no contexto de utilização de células com raios de menor cobertura, baixo custo e o aumento de número de células, resultando assim em aumento da capacidade da rede [CLAUSSEN et al, 2008].

A demanda por maiores velocidades e recursos para dispositivos móveis têm levado ao crescimento de estudos voltados a novas tecnologias de acesso por rádio (HSPA (*High Speed Packet Access*), LTE (*Long Term Evolution*), LTE-A (*Long Term Evolution – Advanced*)), provendo uma migração dos dispositivos das redes tradicionais 3G (3ª Geração) para as redes de

4G (4ª Geração) [LIN et al, 2011].

Em âmbito mundial os sistemas de telefonia celular estão crescendo vertiginosamente. No Brasil, dados divulgados pela ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) indicam que o país registrou, em 2013, 271,10 milhões de linhas ativas na telefonia móvel e foram registradas 9,92 milhões de novas habilitações [ANATEL, 2014]. No último mês de 2013, os acessos pré-pagos totalizavam 211,58 milhões (78,05% do total) e os pós-pagos 59,52 milhões (21,95%). A banda larga móvel totalizou 103,11 milhões de acessos, dos quais 1,31 milhões são de terminais 4G.

Em adição, há um outro tema que atualmente tem sido abordado de maneira recorrente: o conceito de Redes Verdes (*Green Networks*), que possui foco no esforço para economia de energia e redução de emissão do CO₂ (Dióxido de Carbono). Neste contexto, em dezembro de 2008, a CE (Comissão Europeia) decidiu reduzir a emissão de CO₂ em 20% e melhorar a eficiência energética também em 20% até o ano de 2020 [UNIÃO EUROPEIA, 2014].

De acordo com WANG et al (2012), 57% do consumo de energia do setor de TIC (Tecnologia da Informação e Comunicação) são atribuídos aos usuários e dispositivos de redes móveis e sem fio e este número ainda se encontra em franca expansão. É importante ressaltar que a economia de energia de sistemas de comunicações móveis está em grande medida, relacionada à redução do consumo de energia nas BSs e MSs [KIM & CHO, 2009]. Assim, fomentar o crescimento no provisionamento das redes sem fio e ao mesmo tempo reduzir os gastos energéticos, é fundamental para a sociedade e, portanto, um dos desafios para o setor de TIC nos próximos anos. Assim sendo, torna-se primordial e imprescindível haver ferramentas e metodologias capazes de avaliar e mensurar os impactos e as especificidades desse novo cenário de redes sem fio.

Outro ponto determinante para a melhoria do acesso as redes móveis são as técnicas de QoS (*Quality of Service* – Qualidade de Serviço) oferecido ao usuário final. Muitos provedores de acesso utilizam métricas de QoS como base para realizar políticas de alocação de recursos e controle de qualidade das redes. Entretanto, quando são consideradas aplicações multimídias e o provisionamento de QoS em termos de vazão, atraso, *jitter* e perda de pacotes, tais métricas servem atualmente somente como um indicador de desempenho esperado do serviço fornecido e não um indicador em relação à percepção que o usuário final tem da aplicação [TAKAHATA et al, 2003] [FALLAHI & HOSSAIN, 2007] [ZHENG et al, 2000].

A QoS de uma rede é garantida pelos equipamentos e componentes nela utilizados, estando baseada em um mecanismo fim a fim para assegurar a entrega de informações e que deve atuar na comunicação dos equipamentos envolvidos. O impacto da degradação dos fluxos de dados pode ser trivial, quando ele não é percebido pelos usuários finais. Entretanto, devido às limitações das tradicionais métricas de QoS acerca da percepção do usuário final, em aplicações multimídia, foram

introduzidas métricas de QoE (*Quality of Experience* – Qualidade de Experiência) para avaliação de desempenho desse tipo de aplicação.

Como forma de resolução das limitações das métricas de QoS para controle de qualidade e desempenho da rede, no que diz respeito à percepção de usuários finais e aspectos subjetivos relacionados a aplicações multimídia, uma nova abordagem vem sendo estudada, baseada em métricas de QoE. As operações referentes ao controle de recursos da rede, incluindo-se mobilidade baseadas em métricas de QoE podem ser usadas para configurar e avaliar o desempenho de elementos da rede de maneira a otimizar os recursos e garantir uma melhor percepção do conteúdo por parte dos usuários das aplicações multimídia. O ITU-T (*International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector*) [ITU-R Recommendation BT.500-7, 1990] e o VQEG (*Video Quality Experts Group*) [VQEG, 2014] são organizações que vem investigando formas de aplicar QoE na avaliação de diferentes cenários fixos e móveis, sendo porém, ainda considerado como um desafio a ser superado.

Diversas tecnologias fornecem suporte à QoS, porém não há garantias que, em um ambiente heterogêneo seja possível manter a qualidade dos serviços à medida que o usuário troca de rede (mudança de tecnologias de acesso) devido sua mobilidade. E também não há garantias de suporte adequado à QoE para aplicações multimídia [NKANSAH-GYEKYE & AGBINYA, 2008] [KASSAR et al, 2008].

Em se tratando de mobilidade de usuários nas redes móveis um grande desafio é o processo de *handoff* ou *handover* [HONG & RAPPAPORT, 1986] de forma transparente, isto é, sem que o usuário perceba a degradação na qualidade de sua sessão em andamento à medida que há mudança de AP (*Access Point* – Ponto de Acesso) ou BS (*Base Station* – Estação Base)¹. Essa troca de AP/BS pode ocorrer por diversos motivos. O principal motivo é a degradação do sinal do AP/BS atual, que faz com que a MS (*Mobile Station* – Estação Móvel) procure uma alternativa melhor para continuar usufruindo dos serviços utilizados. A degradação pode ocorrer por problemas de radiopropagação ou pela mobilidade do usuário. Um determinado cliente móvel (MS) que esteja com uma sessão por meio de uma BS/AP e se desloca, poderá mover-se para a área de cobertura de outra BS/AP. Neste caso, a nova BS/AP poderá ser escolhida por oferecer melhor qualidade de enlace ou porque o processo de *handover* é mandatório, uma vez que o usuário perderá a conectividade com a BS/AP atual. Assim, todos os dados que o cliente estiver recebendo via BS/AP antiga, terão que ser reenviados para a nova estação.

Devido à necessidade da conectividade transparente para os usuários, o IEEE (*Institute of*

¹No contexto deste trabalho, o AP é tratado como uma *femtocell* e o BS como uma *macrocell*

Electrical and Electronics Engineers) desenvolveu e aprovou o novo padrão - IEEE 802.21 ou MIH (*Media Independent Handover*). O MIH foi projetado para integrar e gerenciar a mobilidade entre redes sem fio de diferentes tecnologias, bem como para permitir o *handover* horizontal e vertical (*handover* entre tecnologias distintas) [HEIDARINEZHAD et al, 2009] [HUANG et al, 2010].

Neste contexto, esta dissertação propõe uma estratégia de avaliação de desempenho e validação de modelos utilizados no processo de *handover*, cujo o foco é utilizar uma política *Markoviana* para auxílio ao *handover* de MSs e avaliar o desempenho em aplicações multimídias, visando aos parâmetros de QoE, a partir do uso de simulação discreta.

1.1 Motivação

Cada vez mais as tecnologias sem fio ganham importância no mundo das telecomunicações pelo fato de oferecerem grandes vantagens ao usuário final, notadamente à mobilidade. Isto é, um usuário pode ter acesso aos serviços e informações em qualquer lugar e a qualquer momento sem a necessidade de estar conectado fisicamente a uma rede.

O grande aumento relacionado ao uso de tráfego de voz e dados (músicas, vídeos, etc) das redes celulares vem sobrecarregando a capacidade das redes celulares atuais, tendendo a levá-las aos seus limites em um futuro próximo. Tal crescimento vem transformando o setor de TIC em um responsável por grandes emissões de CO₂ derivado do consumo de energia das BSs, que estão sendo implantadas de forma densa e em muitos casos desordenada. Em função do exposto, a eficiência energética vem sendo considerada como um parâmetro importante a ser considerado na concepção de sistemas de comunicações, considerando-se obrigatoriamente a redução do consumo de energia das BSs e MSs, com vistas à redução de emissão de poluentes na natureza, convergindo cada vez mais para o conceito de Redes Verdes [KIM & CHO, 2009].

Seguindo o contexto de economia de energia, a tecnologia *femtocell* pode ser apontada como uma possível solução para tal problema. Entretanto, as *femtocells* têm características que podem limitar a QoS e reduzir a eficiência da rede por serem autoconfiguráveis, uma vez que utilizam como padrão de *handover* o nível de potência de sinal. Atualmente, diversas tecnologias fornecem suporte à QoS, porém quando se trata de ambientes heterogêneos, não há garantias para manter a qualidade à medida que o dispositivo faça *handover* devido a sua mobilidade. E também não há garantias de suporte adequado para QoE para aplicações multimídia [NKANSAH-GYEKYE & AGBINYA, 2008].

As novas arquiteturas passam a ser avaliadas baseadas também em métricas de QoE, pois o grande objetivo em qualquer arquitetura é prover o máximo de satisfação para os seus clientes. Com

o crescimento e sucesso do uso de aplicações multimídias em dispositivos móveis, como IPTV (*Internet Protocol Television*) [SHE et al, 2007] ou sites de armazenamento de vídeos (como o *YouTube*), torna-se imprescindível avaliar o impacto destes tipos de aplicações sob a perspectiva do usuário final, já que a qualificação de um vídeo é bastante subjetiva dependendo bastante do ponto de vista e opinião de quem está assistindo ao vídeo.

Considerando os aspectos de QoS e eficiência energética em Cardoso et al. (2012) foi modelado um processo *Markoviano* de decisão, definindo uma política ótima, que auxilia o dispositivo móvel no processo de *handover*. Diante do exposto, este trabalho apresenta um modelo de simulação utilizando a política citada anteriormente e avaliando o desempenho de aplicações multimídia, sob a ótica das métricas de QoE, complementando e ampliando, desta forma, a avaliação proposta em Cardoso et al. (2012).

1.2 Objetivo Geral

O objetivo precípua desta dissertação é propor uma estratégia de planejamento e avaliação de desempenho, baseada em simulação discreta, para prover auxílio no processo de *handover* em redes *macrocell/femtocell*, levando-se em consideração aspectos de QoE. Tal estratégia potencializa a política proposta em Cardoso et al. (2012), aferindo-se se tal política atende, de modo satisfatório, o leque de aplicações multimídia atualmente predominantes em sistemas celulares.

1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Criar cenários para simulação utilizando *macrocell* e *femtocell*;
- Utiliza o módulo MIH para prover mobilidade e *handover* entre tecnologias distintas;
- Elaborar uma estratégia de avaliação de desempenho a partir de métricas de QoE;
- Simular, coletar e analisar os resultados obtidos da estratégia proposta.

1.4 Organização da Dissertação

Esta dissertação possui a seguinte estrutura:

- Capítulo 2: Apresenta uma revisão bibliográfica para mostrar os componentes e termos utilizados neste trabalho, abordando principalmente a evolução das redes celulares sem fio e o uso das *femtocells*, e também a técnica de simulação.

- Capítulo 3: Apresenta os trabalhos relacionados ao estudo proposto por este trabalho e mostra as lacunas que podem ser preenchidas pela estratégia proposta.
- Capítulo 4: Detalha a metodologia adotada para a concepção da estratégia, mostrando principalmente os parâmetros utilizados para a simulação.
- Capítulo 5: Mostra os resultados e as análises das simulações usando a proposta do trabalho.
- Capítulo 6: Demonstra as considerações finais, mostrando as contribuições do trabalho, dificuldades encontradas e trabalhos futuros.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, faz-se uma descrição das tecnologias e componentes que serão utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho, começando com uma breve descrição sobre o crescimento da comunicação de dados móveis, mostrando os elementos que compõe as redes celulares e a evolução delas. Apresentam-se também os conceitos e arquitetura das *femtocells*. Demonstra-se também um *overview* da técnica de simulação para avaliação de desempenho.

2.2 Redes móveis

As primeiras gerações de tecnologia de redes móveis transmitiam somente voz, sendo as principais a TACS (*Total Access Communications System*) na Europa e AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*) nos EUA. A segunda geração foi dividida em duas tecnologias CDMA (*Code Division Multiple Access*) nos EUA e GSM (*Global System Mobile*) na Europa. O CDMA utilizava a tecnologia de espelhamento espectral e multiplexação por divisão de código e foi criada inicialmente para voz e permitia a transmissão de dados de baixas velocidades. O GSM utilizava comutação por circuito com TDMA (*Time Division Multiple Access*) para transmissão de voz e o HSCSD (*High-Speed Circuit-Switched Data*) para transmissão de SMS (*Short Message Service*) [KOROWAJCZUK, 2011].

O primeiro padrão a considerar transmissão de pacotes foi o GPRS (*General Packet Radio Service*), implantado em 2001 com taxas teóricas de 57 a 114 kbps, sendo 14,4 a 28,8 kbps valores mais próximos da realidade. Ele foi seguido pelo EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*) em 2002 com taxas teóricas de 384 kbps, sendo 56 kbps um valor mais realístico. Ambas as tecnologias ainda trabalhavam em canais desenvolvidos para transmissão de voz. A partir disso, ficou visível a necessidade de um novo padrão que pudesse prover canais apropriados para transmissão de dados, separando-os dos canais de voz.

Então, surgiu a 3G para atender essa demanda. Nessa nova geração, o GSM mudou sua tecnologia para CDMA utilizando a tecnologia de transmissão WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) e utilizando o padrão UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) [KOROWAJCZUK, 2011]. Inicialmente, o UMTS foi definido para voz, porém tinha grande potencial para adicionar canais otimizados para dados. Diante disso surgiu o HSDPA (*High Speed*

Downlink Packet Access) para tráfego de *downlink* e o HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*) para tráfego *uplink*. Ambas as tecnologias foram consolidadas no HSPA e HSPA+ (*Release 7*).

Em dezembro de 2008 o 3GPP, anunciou o que seria a 4G de redes móveis chamada LTE que utilizaria a tecnologia de OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) para transmissão, a mesma utilizada em alguns padrões 802.11 e WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*). Em testes de laboratório, uma rede experimental de LTE com 20 MHz de espectro, alcançou aproximadamente, 300 Mbps de *download* e 75 Mbps de *upload*. Entretanto, a velocidade real de navegação beira aos 100 Mbps de *download* e 50 Mbps de *upload*. A Tabela 1 resume as tecnologias com suas respectivas características de transmissão.

Tabela 1: Características das principais tecnologias celular [SILVA, 2014].

Geração	2G			3G				4G
Tecnologia	GSM	GPRS	EDGE	WCDMA	HSPA	HSPA+	LTE (Rel. 8)	LTE-Advanced
Vazão teórica (downlink)	14,4 kbps	114 kbps	384 kbps	2 Mbps	7,2/14,4 Mbps	21/42 Mbps	100 Mbps	1 Gbps
Vazão teórica (uplink)	-	-	473,6 kbps	474 kbps	5,76 Mbps	7,2/11,5 Mbps	50 Mbps	0,5 Gbps
Tamanho do canal (MHz)	0,2	0,2	0,2	5	5	5	20	100
Latência (ms)	500	500	300	250	~ 70	~ 30	~ 10	< 5

2.2.1 LTE

A tecnologia LTE ainda está dentro dos sistemas 3G, tendo compatibilidade com as redes HSPA e GSM incrementando as taxas de transmissão para 100Mbps para *download* e 50Mbps para *upload*, e operando em uma banda de frequência de até 20Mhz [DAHLMAN et al, 2011].

A tecnologia LTE utiliza a técnica TDD (*Time Division Duplex*) que utiliza a mesma faixa de frequência para a transmissão e recepção em tempos distintos, por isso tem a desvantagem da transmissão de *Download* e *Upload* não poderem ocorrer simultaneamente e também utiliza a técnica FDD (*Frequency Division Duplex*) que divide a frequência para poder transmitir e receber ao mesmo tempo [DAHLMAN et al, 2011].

O esquema de transmissão para *download* utiliza a técnica OFDM que possui a vantagem de enviar múltiplos sinais em diferentes frequências, desta forma uma única transmissão com múltiplos

sinais tem uma menor ocupação do espectro, além de apresentar imunidade quanto aos gerados de multi-percursos. Um sinal OFDM é um somatório de sub-portadoras ortogonais, sendo que os dados de cada sub-portadora são independentemente modulados [KOROWAJCZUK, 2011].

Quando se trata de *upload* o esquema de transmissão utiliza a técnica DFTS-OFDM (*Discrete-Fourier-Transform Spread OFDM*) que permite pequenas variações na potência do sinal transmitido e atribuição de largura de banda flexível. A transmissão por um único portador permite uma amplificação de potência que pode significar no aumento da área de cobertura, a comunicação no sentido de *uplink* tem menos restrições em relação a recursos e processamento de sinal.

Entre os principais recursos da tecnologia LTE estão à transmissão com uso de canal compartilhado e o uso de múltiplas antenas, tanto nas estações base quanto nos terminais móveis. No primeiro recurso citado os escalonadores determinam o tempo e os recursos que são compartilhados, escolhem os canais com melhores condições tanto no domínio do tempo, quanto da frequência, devido a esse controle feito pelos escalonadores, eles se tornam determinantes para que ocorra um bom desempenho das transmissões. No segundo recurso, todos os clientes LTE possuem duas antenas receptoras melhorando a taxa de transmissão para *download*. As estações base também utilizam múltiplas antenas melhorando a relação sinal-ruído e ampliando a área de cobertura [SESIA et al, 2011].

O LTE utiliza o conceito de múltiplas antenas, uma vez que estas são utilizadas para aumentar a cobertura, capacidade da camada física e eficiência espectral. A multiplexação espacial, que também pode ser denominada MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), utilizada no LTE permite melhores condições dos canais e conseqüentemente melhores taxas de transmissão, com o MIMO os sinais transmitidos percorrem diferentes caminhos através de canais paralelos para transmissões [SÁ, 2010].

O LTE também é baseada na entrega de pacotes com base no endereçamento IP, na Figura 1 a seguir podemos observar a arquitetura LTE, no qual o núcleo da rede é composto por uma entidade denominada AGW (*Access Gateway*) que incorpora mais três entidades: P-GW (*PDN Gateway*) responsável pela alocação de IP aos clientes móveis; MME (*Mobility Management Entity*) responsável pela comunicação do núcleo da rede com os clientes móveis e gerenciamento de mobilidade (*handover*); e S-GW (*Serving Gateway*) que é responsável pelo redirecionamento dos pacotes IP para clientes móveis.

Em uma arquitetura LTE as estações base são chamadas de eNodeBs que possuem as atribuições de selecionar a melhor rota, realizar o agendamento dos pacotes, alocar os recursos para *download* e *upload* para os clientes móveis e principalmente fazer o controle de admissão dos usuários.

Figura 1: Arquitetura LTE [3GPP, 2010.]

Essa nova arquitetura chamada de EPS (*Evolved Packet System*) é dividida em núcleo da rede (*core network*) e rede de acesso (*access network*). O núcleo da rede é conhecido como SAE (*System Architecture Evolution*) e é baseada no EPC. A rede de acesso implementa o padrão de acesso ao rádio E-UTRAN que é baseado no LTE. Os termos SAE e LTE têm sido substituídos por EPC e E-UTRAN, respectivamente. LTE tem sido usado como nome comercial do EPS. Esta arquitetura permite uma drástica redução de custos referentes a operação e aquisição de equipamentos, uma vez que o E-UTRAN pode ser compartilhado por várias operadoras enquanto no EPC cada uma possui equipamentos próprios e define a sua própria topologia [KOROWAJCZUK, 2011].

O UE (*User Equipment*) é o dispositivo que o usuário utiliza para comunicação, como um *smartphone*, *tablet*, ou modem 4G. A E-UTRAN consiste no novo padrão que substitui a interface de acesso por rádio das tecnologias UMTS, HSPA e HSPA+, provendo maiores taxas de *downlink* e *uplink*, menor latência, além de ser otimizada para trabalhar com pacotes. É composta de *eNodeBs* que agregam todas as funções antes exercidas pela *NodeBs* e RNCs na antiga UTRAN, ou seja, realizam funções de gerenciamento de recursos, controle de admissão, escalonamento, compressão de cabeçalho, criptografia, negociação de QoS no *uplink* e *broadcasts* contendo informações da célula. Além disso, as *eNodeBs* podem comunicar-se diretamente através da interface X2, além de se comunicarem com o EPC através da interface S1 [KOROWAJCZUK, 2011].

O SAE é a arquitetura do núcleo da rede definida pelo 3GPP para o LTE. O SAE é a evolução do núcleo da rede GPRS, com algumas diferenças: arquitetura simplificada, conceito de redes *All-IP*, suporte a redes de acesso de altas taxas de velocidade e baixa latência, suporte a mobilidade entre redes de acesso heterogêneas, como E-UTRAN e *LTE-Advanced*, redes de acesso

legadas, como GERAN e UTRAN, bem como redes não-3GPP, como WiMAX e CDMA2000, por exemplo [OLSSON et al, 2009].

O principal subsistema do SAE é o EPC. No EPC estão contidos os principais elementos da rede. As funções desempenhadas por cada elemento são descritas abaixo:

- **MME (*Mobility Management Entity*)**: é o elemento de controle principal no EPC. Entre as suas funções estão autenticação, segurança, gerenciamento de mobilidade, gerenciamento de perfil do usuário, conexão e autorização de serviços.
- **S-GW (*Serving Gateway*)** : faz o roteamento dos pacotes de dados dos usuários entre a rede LTE e outras tecnologias como o 2G e 3G utilizando a interface S4. Gerencia e armazena informações do UE como parâmetros de serviços IP suportados e informações sobre o roteamento interno dos pacotes na rede [OLSSON et al, 2009].
- **P-GW (*PDN Gateway*)**: é o roteador de borda entre o EPS e redes de pacotes externas. Realiza a alocação de endereços IP para o UE, filtragem de pacotes e auxilia o PCRF na aplicação de políticas de QoS [KOROWAJCZUK, 2011].
- **PCRF (*Policy and Charging Rule Function*)**: se refere ao elemento de rede LTE que é responsável pelo PCC – Política e Controle de Carga. O PCRF decide quando e como se deve gerenciar os serviços em termos de QoS e dá informações a respeito para o P-GW e se é aplicável para o S-GW. Desta forma, provê o QoS adequado para que os serviços solicitados possam utilizar os recursos apropriados.
- **HSS (*Home Subscriber Server*)**: se refere ao elemento LTE que é o banco de dados de registro do usuário.

Mesmo com toda a evolução das redes móveis ainda existem problemas em relação a ambientes fechados, em grande parte dos casos a cobertura é ineficiente para atender a demanda através das *macrocells*, não chegando a níveis exigidos de prestação de serviços com qualidade [COSTA, 2013]. Nesse sentido, as empresas do setor têm investido em alternativas tecnológicas, focadas principalmente na melhoria de sinal para ambientes *indoor*. Uma possível solução é a implantação da tecnologia *femtocell*, pois tem um forte potencial para melhorar as capacidades dos sistemas de redes sem fio de próxima geração, uma vez que oferecem melhores níveis de sinal em ambientes fechados. A tecnologia *femtocell* será abordada na próxima seção.

2.2.2 Femtocell

Femtocell é o termo utilizado para um sistema de uso de ERB (Estações Rádio-Base) celular de baixa potência [KIM et al, 2009] para aplicação *indoor*, ou seja, um ponto de comunicação para redes celulares que serão utilizados dentro de uma residência ou de empresa de pequeno porte [SILVA, 2014]. A *femtocell* opera nas frequências das tecnologias 3G (CDMA e GSM) e também nas tecnologias de 4G (LTE e WiMAX), com a finalidade de potencializar o sinal em áreas restritas (podendo variar de 10 a 50 metros) [CLAUSSEN et al, 2008].

Figura 2: Cobertura das células de redes móveis [TOTAL TELECOM, 2014].

As *femtocells* garantem total compatibilidade com os terminais que os clientes já possuem (2G, 3G ou 4G), funcionando no mesmo espectro de frequência das outras células de rede móvel (*macrocell*, *microcell* e *picocell*), e também suportam todas as funcionalidades/serviços dessas células. As potências de emissão utilizadas são muito inferiores às utilizadas nas células da rede *macrocell*, ficando entre os 20mW e os 100mW, mostrando que estão claramente disponíveis para garantir a cobertura em espaços reservados, como pode ser visto na Figura 2.

A comunicação do AP com a operadora de rede celular é feita através de uma conexão de banda larga residencial (DSL, fibra óptica, etc). Isso contribui para que as operadoras possam oferecer um serviço com mais qualidade, visto que, melhora a capacidade da rede e diminui o número de usuários utilizando as *macrocells*, fazendo com que o usuário final tenha melhores taxas de dados e utilize novos serviços que possuem diversos requisitos [SILVA, 2014]. A Figura 3 demonstra um cenário *femtocell*.

As *femtocells* serão comercializadas pelas operadoras móveis, já que utilizam a mesma frequência de uma operadora específica, cada operadora irá fornecer uma *femtocell*, onde o usuário não precisará fazer nenhuma configuração. A configuração já estará feita quando o usuário adquirir o equipamento.

Figura 3: Cenário *femtocell* [COSTA, 2013].

Do ponto de vista do usuário, instalar uma *femtocell* em casa traz uma série de vantagens: mais cobertura, melhor QoS, alta velocidade de transferência de dados e conexão de baixa latência. Em um longo prazo, pode-se mesmo obter ligações de voz de alta fidelidade e utilizar o celular como uma espécie de controle remoto para sistemas de entretenimento domésticos, com as *femtocells* agindo como se fossem um *hub* que permite ao usuário transferir arquivos de música, vídeos e imagem por computadores, aparelhos de TV e outros dispositivos [FEMTO FÓRUM, 2014].

Sendo uma solução promissora, vários fabricantes já estão produzindo para o mercado e para isso se faz necessário um conjunto de normas para definir como essa tecnologia vai se comportar e trabalhar com as já existentes [FEMTO FÓRUM, 2014].

As normas focam em quatro áreas da tecnologia que são: arquitetura de rede *indoor*, aspectos de rádio e interferência, gestão e segurança. Em nível de arquitetura de redes, as *femtocells* utilizam os protocolos do 3GPP UMTS, utilizados para necessidades emergentes, essa arquitetura pode ser vista de uma forma simplificada na Figura 4.

Femtocell e *Wifi* são comumente confundidos devidos aos seus aparelhos terem aparência semelhante, contudo para cada um existe uma arquitetura e protocolos diferentes. As redes *Wifi* independem da comunicação entre operadoras celulares e os equipamentos podem ser adquiridos e configurados sem maiores problemas pelos usuários. No geral a *Wifi* tem como objetivo ampliar o sinal da Internet, ampliando de forma satisfatória a área de alcance e pode não utilizar cabos para a conexão. Já as *femtocells* são disponibilizadas preferencialmente por estas operadoras, já constando as configurações necessárias para que ela trabalhe como uma ERB da operadora.

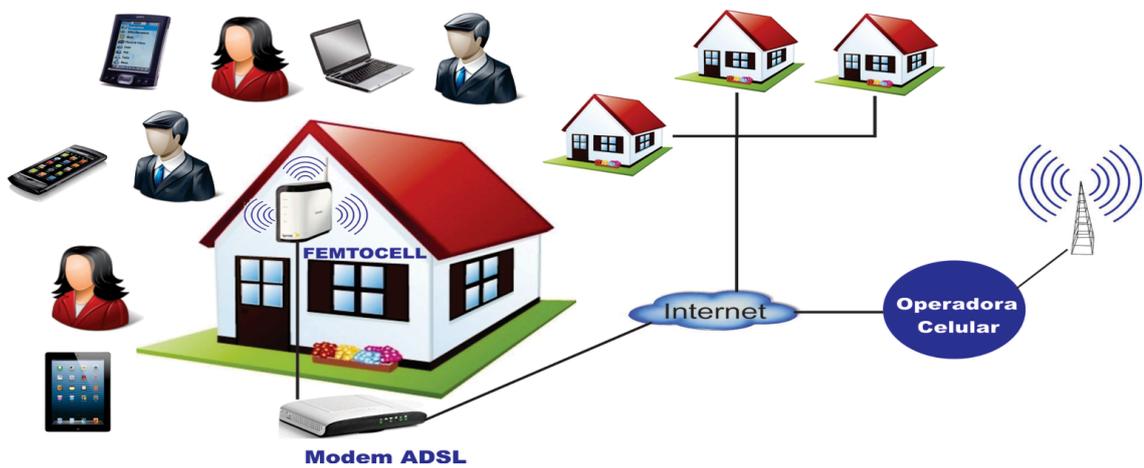


Figura 4: Arquitetura da rede *femtocell indoor* [COSTA, 2013].

Algumas características que podem mostrar a diferença entre as duas tecnologias podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2: Características das tecnologias *Femtocell* e *Wifi* [COSTA, 2013].

	<i>Femtocell</i>	<i>Wifi</i>
Espectro	Licenciada (Operador atribuído)	Sem licença
Frequência	1,9 GHz a 2,6 GHz	2,4 GHz a 5GHz
Potência	10 mW a 100 mW	100 mW a 200 mW
Alcance	20 m a 50 m	100 m a 200 m
<i>Backhaul</i>	Rede IP	Rede IP
Taxas de dados	7,2 Mbps a 14,4 Mbps	11 Mbps a 54 Mbps
Número de usuários ativos	1-16	Escalável
Desvantagens	Interferência com <i>macrocell</i> Custo do ponto de acesso	<i>Dual-mode</i> aparelho requerido

Como pode ser observado, a *femtocell* é uma tecnologia de baixo custo que fornece conexão e capacidade, onde a tecnologia *macrocell* não consegue atender. Assim, os operadores podem fornecer serviços com mais qualidade a custos inferiores. Ao contrário das grandes redes e seus custosos processos de construção, nas *femtocells*, o investimento das operadoras está diretamente

ligado à demanda dos assinantes, aos contratos e à receita de cada uma delas.

2.3 Simulação

Quando se utiliza a técnica de modelagem por simulação, pretende-se simular o comportamento do sistema, para que se tenha uma ideia do desempenho deste. Com ela, podem-se realizar previsões, pois não há a necessidade do sistema pronto. Para tanto, um modelo do sistema que se deseja implementar (ou mesmo de um sistema já implementado) é criado, para facilitar e observar os fatores que interferem no seu comportamento.

A abordagem consiste em construir um modelo que simule o funcionamento do sistema a ser avaliado. Este modelo descreve as características funcionais do sistema em uma escala de tempo adequada [PIDD, 2006].

Os sistemas modelados podem alterar suas características com o tempo ou não, diferenciando simulações estáticas e dinâmicas, respectivamente. Conforme descrito em [JAIN, 1991] diferentes tipos de simulações são encontradas, tais como emulação, Monte Carlo, *trace-driven*, *discret event* e *execution-driven*.

O modelo deve conter detalhes importantes referentes ao sistema, mas não necessariamente sua totalidade, utilizando um certo nível de abstração. Contudo, é importante levar em consideração que a abstração não deve acarretar na inclusão de erros no modelo e, nem mesmo na exclusão de características importantes.

De forma comparativa, a simulação costuma ser menos dispendiosa e utiliza menos tempo que as outras técnicas para que se tenha resultados, permitindo também que sejam feitos inúmeros experimentos. Porém, por se tratar de uma abstração da realidade, a fidelidade das mediadas tende a ser menor na simulação se comparado com a monitoração. Além disso, da mesma forma que a monitoração, a quantidade e representatividade das amostras consideradas são muito importantes para obtenção de resultados corretos.

Para este trabalho, utilizou-se a simulação discreta, pois se consideram somente os eventos onde há alteração do sistema, ou seja, eventos em que o tempo decorrido entre alterações do estado do sistema não é relevante para a obtenção dos resultados da simulação.

A utilização de simulação vem aumentando significativamente, uma vez que estes permitem o estudo e a avaliação de sistemas a custos reduzidos. Os simuladores de rede desempenham um papel importante na tarefa de desenvolver, analisar e aperfeiçoar protocolos de comunicação.

Existem diversos tipos de simuladores. Entre eles, os dotados de interface gráfica que permitem que os usuários trabalhem visualizando a estrutura do projeto. Alguns são ambientes que

utilizam programação orientada a objetos e são baseado em linhas de código para a especificação do que será utilizado.

Entre os diversos simuladores existentes, os mais citados na literatura são: o OPNET, que é um *software* proprietário e possui ambiente gráfico, contendo uma versão acadêmica bastante limitada, e os outros dois são chamados de NS-2 e NS-3 (*Network Simulator 3*), estes são de código aberto e seu desenvolvimento dá-se via linguagem C++ e sem interface gráfica, nas próximas seções esses simuladores são mais detalhados.

2.3.1 NS-2 (*Network Simulator - 2*)

O NS-2 é um simulador de eventos discreto resultante de um projeto conhecido como VINT (*Virtual Inter Network Testbed*). Dentre outros, compõe esse projeto a DARPA, USC/ISI, Xerox PARC, LBNL, e a Universidade de Berkeley na Califórnia. Dentre as vantagens deste simulador se destaca o fato dele ser totalmente gratuito e com código fonte aberto, permitindo ao usuário ajustá-lo de acordo com sua necessidade. O NS-2 oferece suporte à simulação de um grande número de tecnologias de rede (com ou sem fio), diferentes cenários baseados nos protocolos TCP (*Transmission Control Protocol*) e UDP (*User Datagram Protocol*), diversos escalonadores e políticas de fila, caracterização de tráfego com diversas distribuições estatísticas e muitas outras vantagens [NETWORK SIMULATOR – NS-2, 2015].

A programação no NS-2 é feita com duas linguagens: C++ para a estrutura básica (protocolos, agentes, etc) e OTCL (*Objected-oriented Tool Command Language*) para uso como *frontend*. OTCL é uma linguagem interpretada, desenvolvida pelo MIT (Instituto de Tecnologia de Massachusetts). O uso de uma linguagem interpretada facilita a alteração dos *scripts* sem a necessidade de recompilar. Assim, um usuário escreve suas simulações em *scripts* OTCL, utilizando-se dos componentes disponíveis na ferramenta, como os objetos C++ gerados na compilação do núcleo do NS-2. O motivo para se utilizar duas linguagens de programação baseia-se em duas diferentes necessidades, a primeira é a utilização de uma linguagem mais robusta para a manipulação de *bytes*, pacotes e, de outro, para implementar algoritmos capazes de executar um grande conjunto de dados [NETWORK SIMULATOR – NS-2, 2015].

Nos *scripts* de simulação, o usuário inicia o escalonador de eventos e depois configura os parâmetros da rede, determinando sua topologia, padrão de movimento, modelo de transmissão, modelo de bateria, padrão de tráfego, protocolos e agentes envolvidos. A execução desses *scripts* resulta em arquivos de saída, contendo informações detalhadas dessas simulações, que podem ser utilizadas nas análises e avaliações.

2.3.2 NS-3 (*Network Simulator - 3*)

O NS-3 é um *software* gratuito, distribuído sob a licença GNU GPLv2 e que é disponibilizado gratuitamente para investigação, desenvolvimento e utilização. O projeto NS-3 é financiado por várias instituições como a Universidade de Washington, o *Geórgia Institute of Technology* e o *ICSI Center for Internet Research*, tendo ainda o suporte do *Planète research group* do INRIA Sophia-Antipolis [NETWORK SIMULATOR – NS-3, 2015]. O NS-3 é escrito em C++ e Python e esta disponível para vários sistemas operacionais como Linux, OS X e Windows através da utilização do Cygwin (Cygwin é um ambiente Linux para Windows).

Algumas funcionalidades do NS-2 já foram portadas para o NS-3. O projeto continuará mantendo o NS-2 enquanto o NS-3 estiver em fase de desenvolvimento e formas de integração e transição estão em estudo. O NS-3 é código aberto e existe um grande esforço para manter um ambiente aberto para pesquisadores que queiram contribuir e compartilhar software com o projeto.

No NS-3, o simulador é escrito em C++ com suporte opcional a Python. Desta forma, os códigos de simulação podem ser escritos somente em C++ ou Python. O motivo para se utilizar duas linguagens de programação baseia-se em duas diferentes necessidades. De um lado existe a necessidade de uma linguagem mais robusta para a manipulação de bytes, pacotes e para programar algoritmos que rodem um grande conjunto de dados. De outro, é necessária a utilização de ferramentas para que se possa compilar os arquivos fontes e gerar os executáveis, neste contexto a ferramenta mais conhecida é o *make*. Porém, esta tarefa, através do *make*, torna-se árdua. Por este motivo, muitas alternativas foram desenvolvidas, utilizando principalmente a linguagem *python* [NETWORK SIMULATOR – NS-3, 2015].

O *Waf* é utilizado para gerar os binários no projeto ns-3. Ele faz parte da nova geração de sistemas de compilação e construção baseados em Python. O ns-3 fornece um conjunto de modelos de simulação de rede implementados como objetos C++ e envolto por *python*.

Os usuários normalmente interagem com esta biblioteca, escrevendo um código ou um aplicativo *python* que instancia um conjunto de modelos de simulação para configurar o cenário de simulação de interesse. A entrada se dá no *main loop* simulação, e tem-se a saída quando a simulação é concluída.

2.3.3 OPNET

É um simulador largamente utilizado como instrumento para modelagem de redes de telecomunicações [OPNET, 2015]. Possui um ambiente de trabalho que permite criar uma rede a partir de uma biblioteca de modelos e definir parâmetros não só ao ambiente, como também de cada objeto que a compõe, e os impactos de suas variações.

No âmbito educacional, sua utilização é garantida, pois uma de suas grandes vantagens é a interface gráfica fornecida ao usuário para configurar cenários além da possibilidade didática de visualizar resultados. O OPNET foi desenvolvido pela RIVERBED, uma empresa Norte Americana [OPNET, 2015]. Observa-se que todos os resultados, topologias, configurações e simulações podem ser apresentados de forma intuitiva. Os parâmetros também podem ser ajustados e os experimentos podem ser repetidos facilmente, a partir de triviais operações na GUI (*Graphical User Interface*), que nada mais é do que um ambiente com todos os parâmetros que se julgue necessário para a realização de cada simulação.

O OPNET tem três funções principais: modelagem, simulação e análise. Para a modelagem, proporciona ambiente gráfico intuitivo para criar todos os tipos de modelos de redes e protocolos. Para simular, ele usa três diferentes tecnologias e simulações avançadas. Além de simulação de eventos discretos, o Modeler oferece duas outras tecnologias de simulação que exigem menos detalhes do que o oferecido por meio da simulação de eventos discretos. A análise de fluxo que oferece modelagem analítica completa, útil para simulações interativas utilizadas em design de rede e análise de falhas, fornece o tempo de execução mais rápido em relação a outras abordagens e escalas para suportar grandes redes e volumes de tráfego. A outra diz respeito a simulação híbrida, onde é oferecido uma combinação de modelagem de tráfego discreto e analítico para simulações altamente detalhadas.

Por fim, para a análise, os dados e resultados da simulação podem ser exibidos de forma facilitada por uma ferramenta integrada, a partir de gráficos e relatórios condensados.

2.3.4 MIH (*Media Independent Handover*)

O MIH (*Media Independent Handover*) viabiliza o *handover* vertical, isto é, atua entre tecnologias distintas, a partir de um conjunto de serviços, gatilhos e eventos de sinalização unificados para qualquer tecnologia [SILVA et al, 2010]. O MIH é uma entidade *cross-layer* que abrange, principalmente, a unificação da obtenção de informações sobre a rede, dos eventos e dos

mecanismos de controle das camadas inferiores entre as diferentes tecnologias de enlace, a arquitetura do módulo pode ser vista na Figura 5.

Figura 5: Arquitetura do módulo MIH.

Entre os diversos objetivos do MIH, podem-se destacar três:

1. Facilitar a tomada de decisão do mecanismo de controle de mobilidade por meio do acesso às informações sobre o estado dos enlaces, buscando a execução de *handover* com o mínimo de retardo, mesmo entre redes de acesso de tecnologias diversas;
2. Definir métodos e semânticas que facilitem a aquisição de informações em ambientes heterogêneos;
3. Permitir a continuidade da conectividade ao longo dos ambientes, tanto homogêneos quanto heterogêneos, através do controle de mobilidade transparente.

Dessa forma, a mobilidade é feita independente de endereço de rede e tecnologia de comunicação sem fio. Entretanto a tomada de decisão de *handover* no MIH é realizada considerando somente a intensidade de sinal RSS (*Received Signal Strength*) de um AP / BS, sendo insuficiente para assegurar a QoE para o usuário final [BOULHOSA et al, 2011].

O módulo MIH foi adicionado ao NS-2 para auxiliar na decisão de *handover*, em que se aplicou a política na classe *handover* do *tracer handover2.cc*, localizado dentro do diretório do módulo MIH do simulador. Essa classe utiliza três métodos importante que são:

- *Link Up*: método que conecta o MS em uma rede;
- *Link Down*: método que desconecta o MS de uma rede;
- *Link Detected*: método responsável por detectar um novo sinal de rede.

Por intermédio destes três métodos, a classe *handover* recebe informações de uma determinada rede para tomar a decisão de conectar em uma nova rede. A política foi implementada nesta classe afim de modificar a forma de acesso, considerando aspectos de consumo de energia e QoS. Nas duas próximas seções são abordadas as métricas utilizadas para avaliar o desempenho das aplicações multimídia.

2.3.5 QoS (Qualidade de Serviço)

Quando a Internet trabalhava apenas com aplicações simples, a demanda era bem atendida pelo nível de qualidade oferecido. Com o crescimento progressivo da Internet nos últimos anos, surgiram novas aplicações distribuídas, que necessitam de grande largura de banda e são sensíveis a problemas de atraso. Diversas classes de serviços com necessidades de recursos e diferentes prioridades passaram a ser demandadas gerando a necessidade de melhoramento nos serviços oferecidos. Desta necessidade surgiu a ideia do paradigma conhecido como QoS.

O conceito de QoS abrange a garantia de níveis aceitáveis de serviços em diversas camadas no âmbito de rede. A recomendação E.800 da ITU-T define QoS como a totalidade das características de um serviço de telecomunicações que incidem sobre a sua capacidade de satisfazer as necessidades explícitas e implícitas do usuário [ITU-T, 2008].

As métricas de QoS são usadas para caracterizar e descrever o comportamento da rede no que diz respeito à utilização e desempenho, podendo ser definidas por um número específico de parâmetros que deverão ser cumpridos para a implementação da rede de computadores, principalmente quando envolverem o tráfego de informações através de redes mais amplas, como a Internet. A Tabela 3 mostra as principais métricas de QoS.

Tabela 3: Principais métricas de QoS [ITU-T, 2008].

Métrica - Unidade	Descrição
Retardo / Atraso / Latência - ms	Tempo gasto pela rede para transportar um pacote do transmissor ao receptor.
Jitter / Variação do Atraso - ms	Variação máxima do retardo entre pacotes de um fluxo. Se o atraso mínimo é 1ms e o máximo é 6ms, então o jitter é 5ms.
Troughput / Vazão – bits por segundo	Taxa de informação que chega e que é entregue por um nó por unidade de tempo.
Taxa de perda de pacotes - %	Pacotes perdidos em relação ao total de pacotes enviados.

2.3.6 QoE (Qualidade de Experiência)

Os humanos são seres com uma grande capacidade de percepção visual. O SVH (Sistema Visual Humano) é um sistema bastante complexo, porém bastante eficaz, desde a recepção da imagem nos olhos até a condução da informação visual ao cérebro. No cérebro, as informações visuais são processadas extraindo-se características como: cor, luminosidade e contraste. A avaliação de tais características depende bastante da sensibilidade dos olhos humanos. Portanto, uma mesma imagem pode ser agradável para alguns e desagradável para outros [WINKLER, 2005].

O SVH tem servido de base para a criação de novos critérios de avaliação de novas arquiteturas de redes. O sucesso das redes atuais e de próxima geração permitiu a crescente demanda das aplicações multimídia na Internet (IPTV, *streaming* de vídeo, aplicações de áudio e vídeo). Diante disso, surgiu a necessidade de avaliar o impacto destas aplicações perante a visão do usuário final e, por conseguinte, a exigência de um novo arcabouço de métricas qualitativas e quantitativas relacionadas à experiência do usuário [WANG et al, 2004].

O conceito de QoE está relacionado à avaliação das aplicações multimídia do ponto de vista da percepção do usuário. O termo surgiu para suprir as lacunas deixadas pela avaliação tradicional realizada pelas métricas de QoS, que avaliam o impacto das aplicações do ponto de vista da rede para suprir tais requisitos de desempenho. As métricas de QoS não refletem a experiência do usuário diante de um vídeo, por exemplo. Assim, não é possível afirmar se a qualidade do vídeo recebido pelo usuário é realmente boa, pois, se tratando de avaliações deste tipo de aplicação, a sensibilidade humana é primordial.

Os resultados obtidos através dos estudos baseados em métricas de QoE podem servir como extensão das análises de QoS, melhorando o controle de operações nas arquiteturas de redes e os protocolos ou, até mesmo, impulsionando a criação de novos protocolos, voltados para conteúdo multimídia. Esta tem sido uma forte tendência e dois grupos de pesquisa vêm se destacando, são eles o ITU-T [ITU-R *Recommendation* BT.500-7, 1990] e o VQEG [VQEG, 2014].

2.3.6.1 Avaliação Subjetiva

As métricas subjetivas de QoE avaliam a qualidade das aplicações multimídia baseadas na opinião do usuário. O usuário qualifica o vídeo de acordo com a experiência que teve diante do mesmo. Essa qualificação é feita através de uma nota atribuída pelo usuário ao vídeo.

Tais métricas, dependem exclusivamente da opinião/avaliação do usuário final, opinião essa que é de suma importância, pois, por meio dela, objetiva-se melhorar os serviços para os clientes

fnais. A métrica subjetiva mais popular é o MOS (*Mean Option Score*), cuja escala varia de 1 a 5. A Tabela 4 indica a escala da métrica MOS com suas respectivas classificações [ITU-R *Recommendation* BT.500-7, 1990].

Tabela 4: Escala de qualidade MOS [ITU-R *Recommendation* BT.500-7, 1990].

MOS	Qualidade
5	Excelente
4	Bom
3	Regular
2	Pobre
1	Péssimo

2.3.6.2 Avaliação Objetiva

As métricas objetivas de QoE estimam a qualidade do vídeo recebido pelo usuário através de modelos matemáticos quantitativos, cujos valores computados são mapeados em valores subjetivos de qualidade. As principais métricas são: PSNR (*Peak Signal to Noise Ratio*), SSIM (*Structural Similarity Index*) e VQM (*Video Quality Metric*).

2.3.6.2.1 PSNR

O PSNR é a métrica objetiva mais tradicional e compara a qualidade do vídeo recebido pelo usuário em relação ao vídeo original. O PSNR é derivado de outra métrica denominada MSE (*Mean Squared Error*). O MSE calcula a média de erro/variação de uma atributo real em relação ao valor estimado dele mesmo. Em outras palavras, compara a qualidade do *frame* recebido pelo usuário em relação ao *frame* original. O valor de MSE pode ser obtido através da seguinte fórmula [MALKOWSKI & CLABEN, 2008].

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} || Y_s(i, j) - Y_d(i, j) ||^2 \quad (1)$$

Onde:

$M \times N$ = É a quantidade de *pixels* do *frame*.

$Y_s(i, j)$ = Posição (linha, coluna da matriz) do *pixel* no *frame* original.

$Y_d(i, j)$ = Posição (linha, coluna da matriz) do *pixel* no *frame* recebido.

O PSNR é uma derivação do MSE em relação ao valor máximo de luminosidade (grau de claridade ou escuridão) para cada *pixel*. O valor do PSNR é obtido através da seguinte fórmula através da seguinte fórmula, na escala logarítmica:

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{255}{\sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \|Y_S(i,j) - Y_D(i,j)\|^2}} \right) \quad (2)$$

O valor do PSNR é expresso em dB (decibel), para que um vídeo seja classificado como de boa qualidade, esta métrica, deve ter um valor médio de no mínimo 31 dBs, como é mostrado no mapeamento da Tabela 5 em relação ao MOS. O PSNR é a métrica mais popular de QoE, porém não é a mais completa, pois indica apenas a diferença dos *frames* recebidos em relação aos enviados, desconsiderando aspectos importantes do SVH, por isto é necessário a utilização de outras métricas para que a qualidade seja garantida [JAIN, 2004].

Tabela 5: Mapeamento PSNR para MOS.

PSNR (dB)	MOS
>37	5
<31-37>	4
<25-31>	3
<20-25>	2
<20	1

2.3.6.2.2 SSIM

O SSIM, diferentemente do PSNR que apenas analisa a taxa de erro do vídeo recebido em relação ao vídeo original, avalia o vídeo considerando os aspectos do SVH. O SSIM analisa a similaridade de cores, luminosidade e estrutura. Essa métrica surgiu pelo fato do SVH ser altamente eficiente em extrair informações visuais das imagens/vídeos [UEMURA et al, 2008].

Os valores extraídos dos *frames* recebidos e originais são armazenados em três vetores separados: luminosidade, estrutura e cor. Posteriormente, obtém-se a média de cada vetor e a combinação dessas três médias gera o valor do SSIM, indicando a qualidade do vídeo. O valor do SSIM é obtido através da seguinte fórmula [WANG et al, 2004].

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (3)$$

Onde:

μ : é a média;

σ^2 : é a variância;

σ_{xy} : é a covariância de x e y.

$C_1 = (k_1L)^2$, $C_2 = (k_2L)^2$ são duas constantes;

L : é o valor máximo que pode ser atribuído a cada *pixel*;

$k_1 = 0,01$ e $k_2 = 0,03$ por padrão.

O valor de SSIM é expresso como um valor decimal entre 0 e 1. Quanto mais próximo de 0 pior é a qualidade do vídeo, quanto mais próximo de 1, melhor é a qualidade. No caso quando o valor é igual a 1, o vídeo recebido pelo usuário corresponde à 100% do original [TAKAHASHI et al, 2008].

2.3.6.2.3 VQM

A métrica VQM foi desenvolvida pelo ITS (*Institute for Telecommunication Sciences*). Essa métrica é mais completa que o PSNR e o SSIM, pois avalia a distorção das cores, dos *pixels*, do ruído e, ainda, se o vídeo está “borrado”. Com estes parâmetros o VQM se aproxima da forma de avaliação de imagens e vídeos feita pelo SVH [FERRUS et al, 2006].

O VQM, assim como as demais técnicas, baseia-se na comparação do vídeo enviado em relação ao vídeo recebido pelo usuário final. Esta métrica é dividida em quatro partes:

1. Na primeira etapa acontece a comparação de brilho e contraste entre os vídeos;
2. Na segunda é comparado o alinhamento espacial entre eles;
3. A terceira consiste em analisar a quantidade de *pixels* perdidos em relação ao original;
4. E a última etapa faz o alinhamento temporal, que compara o tempo no qual cada *frame* foi recebido em relação ao tempo no qual o mesmo deveria ter sido recebido. Esta etapa avalia o atraso do vídeo.

Por avaliar tais características citadas anteriormente, o VQM é a métrica que mais se aproxima do SVH. O valor resultante do VQM é expresso em um número real, e quanto mais próximo de 0, melhor é a qualidade do vídeo, indicando uma menor distorção em relação ao original.

2.4 Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentados os conceitos básicos para o entendimento do trabalho,

são eles: a evolução das redes celulares, foram apresentados conceitos referentes as tecnologia LTE e *Femtocell* e de forma mais básica as tecnologias antecessoras à essas, e também foi descrita a técnica de simulação que foi utilizada para avaliação de desempenho.

3 – TRABALHOS RELACIONADOS

3.1 Considerações Iniciais

Com o intuito de discutir e motivar novas pesquisas, apresentam-se alguns trabalhos que demonstram os desafios, necessidades e modelos relacionados à implantação de *femtocells*, consumo de energia e avaliação de métricas de QoE. Tem-se como finalidade mostrar a lacuna atendida pela estratégia de avaliação de desempenho de aplicações multimídia em redes LTE proposta por este trabalho.

3.2 Levantamento de Trabalhos Considerados Mais Relevantes

O uso de dispositivos móveis vem se tornando cada vez mais frequentes e necessários no dia a dia das pessoas. As infraestruturas das operadoras existentes não estão sendo capazes de oferecer serviços com qualidade suficiente para os seus utilizadores. A necessidade de acesso converge para melhores qualidades e maiores velocidades no uso de dados. Várias abordagens estão sendo investigadas como formas de oferecer melhorias para os usuários, principalmente se tratando de nível de sinal e sobrecarga das redes. No contexto das redes LTE, uma tecnologia que está sendo bastante explorada como tentativa de diminuir este problema é a *femtocell*.

Nesse sentido, em SILVA (2014) é proposta uma metodologia baseada em simulação discreta para avaliar o impacto da implantação de *femtocell* em redes LTE. O estudo desenvolvido neste trabalho teve como objetivo discutir a efetividade da implantação destas células, considerando a questão da viabilidade da tecnologia como uma interface para melhoria da cobertura e QoS em ambientes *indoor*.

O trabalho apresentado em LEE et al. (2010) mostra que a implantação de *femtocell* pode ter um impacto negativo sobre o desempenho da *macrocell*. A alocação de espectro e a necessidade de evitar interferências eletromagnéticas são obstáculos frequentes encontrados pelas operadoras que desejam implantar esta tecnologia. É feita uma análise da interferência baseada em um cenário realista contendo *macrocell* e *femtocell* utilizando modulação OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*). Para evitar a interferência são utilizadas técnicas de autoconfiguração e auto-otimização.

O artigo de GHOSH et al. (2010) dá uma visão geral e descrições sobre os conceitos e os recursos da camada física da tecnologia LTE, o mesmo também apresenta e discute resultados de

desempenho para transmissões e aborda sobre o suporte que a tecnologia oferece a mobilidade transparente aos usuários. Uma das principais características da tecnologia que é o suporte as aplicações multimídia não é abordada e nem expressa por meio de resultados.

Em YANG et al. (2009), os autores fazem um estudo comparativo entre as tecnologias WiMAX e LTE destacando as características de cada uma, principalmente o bom desempenho de transmissão para áreas de coberturas extensas. Os resultados apresentados são apenas métricas de QoS e não considera a possibilidade de um gerenciamento de mobilidade entre as duas tecnologias com o intuito de oferecer a melhor conectividade.

Em ANDREWS et al. (2012) é feita uma ampla e detalhada revisão da literatura destacando as principais características sobre a tecnologia *femtocell*, fornecendo um levantamento quanto as questões técnicas, de negócio e regulamentares. Apresentando apenas uma visão com base em teoria e regulamentações, sem colocar em prática os conceitos.

Em PIRO et al. (2011) foi avaliada uma arquitetura LTE com resultados de simulação. Os autores implementaram um simulador com as características da tecnologia e obtiveram resultados de vazão em cenários com mobilidade aleatória dos usuários. O artigo não avalia a QoE e nem propõe uma arquitetura com alternativas de conectividade.

O consumo de energia é outro fator motivador para implantação das *femtocells*, tornando-se uma importante medida a ser considerada, reduzindo os custos operacionais e também diminuindo os impactos ambientais. Com isso em SALEM & REGUIGA (2013) é descrita uma política de decisão para reduzir o consumo de energia em *femtocell*, tendo como principal métrica o número de usuários conectados a ela. Como objetivo específico deste trabalho é feito uma investigação e uma criação de métodos inovadores para a redução total de energia necessária para operar uma rede de acesso de rádio e identificar arquiteturas de rádio mais adequadas e com poder significativo de redução no consumo de energia. O trabalho não dá atenção para o consumo de energia dos nós clientes, apenas se preocupando com o núcleo da rede, e não considera aspectos de QoS e QoE.

Ainda sobre a perspectiva de economia de energia, em KONG (2014) é apresentada uma proposta de redução de emissão de CO₂ de uma rede sem fio, ativando e desativando recursos da BS, por intermédio de um PMDTD para a tomada de decisão em cada época, gerenciando os recursos de forma automatizada. Os resultados obtidos demonstram que esta abordagem pode reduzir em até 50% o consumo de energia, sem comprometer a QoS.

Em SOUZA (2013), é analisado o uso da energia e sua avaliação, propondo a utilização de medidas de eficiência energética já existentes, aperfeiçoando-as e/ou adaptando-as para outras áreas. Sugerem a maximização da quantidade de bits transmitidos para cada unidade de energia consumida pela rede, considerando os requisitos dos padrões de redes *macrocell* e, utilizando como

cenário de aplicação redes de comunicações com CDMA.

Os usuários cada vez mais acessam conteúdos multimídia (vídeos, músicas, etc.) através das redes móveis, as métricas usuais de QoS não conseguem atender a percepção do usuário em relação a qualidade do que estão recebendo. Visando a esta necessidade surgem as métricas de QoE para avaliar se o conteúdo recebido está chegando ao usuário final com o mínimo de qualidade.

A importância da utilização das métricas de QoE como parâmetro na tomada de decisão nas novas arquiteturas de redes é discutido em BROOKS & HESTNES (2010). O artigo introduz como as novas arquiteturas devem ser desenvolvidas para dar suporte a QoE, apresentando soluções, como monitorar aplicações de vídeos para estimar a qualidade, porém não aborda situações de congestionamento na rede e nem mesmo considera o *handover* como uma alternativa de obter melhores condições de conexão e também não aborda sobre as redes LTE.

Em VENKATARAMAN et al. (2007), os autores discutem a importância de avaliar o desempenho de novas arquiteturas de redes de computadores baseado na percepção do usuário, por meio de métricas de QoE. Quando as aplicações são do tipo multimídia (áudio, vídeo, etc.) é de suma importância avaliar o impacto das aplicações em métricas de QoS (*jitter*, *delay* e *vazão*), porém somente este tipo de análise não expõe a experiência do usuário diante da aplicação.

O artigo CHERIF et al. (2011) explica a importância do monitoramento de QoE nas novas arquiteturas e por isso utiliza o PSQA (*Pseudo Subjective Quality Assessment*) baseado em redes neurais que faz o mapeamento da avaliação subjetiva do usuário as condições de transmissão da rede com base em atraso e vazão.

A Tabela 6 apresenta uma síntese dos trabalhos relacionados.

Tabela 6: Trabalhos Relacionados.

Trabalho	Proposta
[SILVA. 2014]	O trabalho apresenta uma metodologia baseada em simulação para avaliar o impacto da implantação de <i>femtocell</i> em redes LTE.
[LEE et al, 2010]	O trabalho mostra que a implantação de <i>femtocell</i> pode ter um impacto negativo sobre o desempenho da <i>macrocell</i> .
[GHOSH et al, 2010]	O artigo dá uma visão geral e descrições sobre os conceitos e os recursos da camada física da tecnologia LTE.
[YANG et al, 2009]	O artigo faz um estudo comparativo entre as tecnologias WiMAX e LTE destacando as características de cada uma.
[ANDREWS et al, 2012]	O trabalho apresenta uma ampla e detalhada revisão da literatura destacando as principais

	características sobre a tecnologia <i>femtocell</i> .
[PIRO et al, 2011]	O trabalho fez uma avaliação de uma arquitetura LTE com resultados de simulação.
[SALEM & REGUIGA, 2013]	O trabalho descreve uma política de decisão para reduzir o consumo de energia das <i>femtocells</i> .
[KONG, 2014]	O trabalho apresenta uma proposta de redução de emissão de CO ₂ de uma rede sem fio, ativando e desativando os recursos da rede.
[SOUZA, 2013]	O trabalho analisa o uso de energia e sua avaliação, propondo a utilização de medidas de eficiência energética já existentes, aperfeiçoando-as para outras áreas.
[BROOKS & HESTNES, 2010]	O artigo introduz como as novas arquiteturas devem ser desenvolvidas para dar suporte a QoE.
[VENKATARAMAN et al, 2007]	O trabalho discute a importância de avaliar o desempenho de novas arquiteturas de redes de computadores baseado na percepção do usuário, por meio de métricas de QoE.
[CHERIF et al, 2011]	O artigo explica a importância do monitoramento de QoE nas novas arquiteturas e por isso utiliza (PSQA) baseado em redes neurais.

Diante do levantamento realizado a partir de artigos de referência das áreas envolvidas neste trabalho, as abordagens apresentadas não tratam da avaliação de desempenho de aplicações multimídia, nenhum dos trabalhos demonstra tal avaliação e nem como ela deve ser feita. O trabalho aqui proposto apresenta uma estratégia de avaliação de desempenho de aplicações multimídia em redes LTE considerando métricas de QoE em ambiente heterogêneo utilizando *femtocells* e *macrocells*.

Este tipo de avaliação é necessário para que possa ser visualizado o impacto de tais aplicações nos sistemas celulares atuais, verificando se os sistemas estão prontos para receber essa demanda de aplicações e demonstrar alternativas para melhorar o desempenho do sistema.

3.3 Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentados trabalhos que ilustram o estado da arte de técnicas e modelos empregados em redes *femtocell* considerando conceitos de redes verdes, e também

mostrou metodologias aplicadas para avaliar aplicações multimídia através de QoE. Objetivou-se também demonstrar lacunas existentes, para melhor definir o objetivo deste trabalho. O capítulo a seguir se destina a apresentação da metodologia da estratégia de avaliação de desempenho proposta por este trabalho.

4 – ESTRATÉGIA PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE APLICAÇÕES MULTIMÍDIA EM REDES LTE UTILIZANDO MÉTRICAS DE QoE

4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo serão explicados os componentes utilizados para que a simulação possa ser feita. Mostrando métricas e parâmetros utilizados, além dos cenários utilizados para validação da estratégia proposta.

4.2 Arquitetura da rede

O simulador utilizado foi o NS-2, a escolha foi devido a possibilidade de utilização do módulo MIH, por ele ser um software livre e aberto para modificações de acordo com a necessidade do usuário e pela grande comunidade existente para o desenvolvimento de trabalhos utilizando-o.

Uma rede móvel é assumida de forma a atender a MS que se comunica com as células *macrocell* e *femtocell*, por meio do AP e do BS, as quais fornecem o acesso sem fio (como é mostrado na Figura 6). As chegadas podem ser atendidas por ambas as redes, que têm diferentes distâncias para os MSs, diferentes larguras de banda, perdas e diferentes limites de usuários que

Figura 6: Arquitetura da Rede.

podem conectar-se a cada estação.

Quando uma nova chamada é requisitada, a arquitetura e os parâmetros, tais como o

consumo de energia, a largura de banda disponível e a probabilidade de perda de pacotes de cada rede, são usados para a tomada de decisão de qual rede o usuário irá se conectar. Caso novas chamadas sejam bloqueadas por uma rede devido a limitação de capacidade de conexões, estas serão encaminhadas para outra rede de serviço disponível.

Há duas classes de serviço de acesso à rede: voz e dados. Elas são formadas por novas chamadas e chamadas de *handover*. Estes pedidos chegam ao sistema de acordo com dois processos de *Poisson* e com parâmetros λ_{v_n} e λ_{d_n} , para voz e dados, respectivamente. A variável n indica se o pedido é para se conectar à *macrocell* ($n=m$) ou à *femtocell* ($n=f$), ou se é um pedido que decide a qual célula n deve se conectar.

Os tempos de serviço de chamadas de voz e pacotes de dados seguem distribuições exponenciais com parâmetros $1/\mu_{v_n}$ e $1/\mu_{d_n}$, respectivamente. Além disso, não há diferenciação entre os canais de voz e dados.

É importante esclarecer que o sistema é modelado como observado pelo usuário. Assim, quando o usuário precisa conectar-se para fazer uma chamada de voz ou de dados, a MS tem que decidir em qual rede deve se conectar, utilizando informações referentes à número de conexões, parâmetros de qualidade de serviço e o nível de potência do sinal de cada rede. Este último pode ser obtido diretamente, mas as outras variáveis têm de ser investigadas para o sistema.

4.3 Cenários

Foram criados dois cenários para avaliação de aplicações multimídia que são descritos na Tabela 7. Em todos os cenários a arquitetura da seção 4.3 (Figura 8) foi utilizada. Os usuários começam a simulação próximo à BS e se movimentam em direção ao AP, chegando a uma área onde as duas redes podem alcançar e atendê-los. No ponto final dos usuários a distância para a *femtocell* é de 20 (vinte) metros e para a *macrocell* é de 480 (quatrocentos e oitenta) metros. No primeiro cenário as duas redes estão disponíveis e sem limitações de conexões e os usuários usam a técnica padrão para se conectarem a uma rede (qualidade de sinal) e são feitas variações de usuários entre 5 a 30, denominado *Macro/Femto*. O segundo cenário também utiliza as duas redes para conexões, mas utiliza a política para definir onde cada usuário deverá se conectar, variando também o número de usuários entre 5 a 30, denominado política. Os dois cenários foram avaliados através de métricas de QoE e comparados. Nas simulações apenas um usuário transmite o vídeo, enquanto os outros são para gerar tráfego de *background*.

Tabela 7: Cenários testados.

Cenários	Números de usuários	Tempo de simulação	Número de repetições	Intervalo de Confiança (%)
<i>Macro/Femto</i>	5, 10, 15, 20, 25 e 30	73	30	95
Política	5, 10, 15, 20, 25 e 30	73	30	95

4.3.1 Parâmetros da Simulação

A estratégia para avaliar o desempenho das aplicações multimídia leva em consideração as métricas de QoE da seção anterior. Com isso é possível obter resultados satisfatórios quanto à percepção do usuário de tais aplicações.

A simulação começa com os nós móveis na área de cobertura da *macrocell*, durante a simulação eles se movimentam em direção a *femtocell*, e param em um ponto onde as duas redes têm cobertura. Os testes foram feitos com 5, 10, 15, 20, 25 e 30 usuários, com intervalo de confiança de 95% e tempo de simulação 73 segundos (tempo necessário para conclusão da transmissão do vídeo). Os parâmetros das tecnologias *femtocell* e *macrocell* são apresentados na Tabela 8, e os parâmetros das aplicações de voz, dados e vídeo são apresentados nas Tabelas 9 e 10.

A tecnologia *femtocell* é semelhante ao modem ADSL2+ para rede celular e *macrocell* é como um ponto de acesso LTE/3G.

Tabela 8: Parâmetros da *Macrocell* e *Femtocell* [CARDOSO et al, 2012].

Parâmetros	<i>Macrocell</i>	<i>Femtocell</i>
Potência	25 dBm	13 dBm
Ganho da Antena	1,0 dBi	1,0 dBi
Frequência	2,5 Ghz	2,412 Ghz
Largura de Banda	1 Mbps	5 Mbps
Raio de Cobertura	1 km	50 m
Perda de pacotes	0,5 %	2 %

Tabela 9: Parâmetros das aplicações de Voz e Dados [CARDOSO et al, 2012].

Parâmetros	Voz	Dados
Tamanho do Pacote	244 bits	1024 bits
Taxa de Dados	12,2 Kbps	300 Kbps
Protocolo	UDP	UDP

Tabela 10: Parâmetros de Vídeo [FERREIRA JÚNIOR, 2013] [EVALVID, 2015].

Vídeo	Resolução 352 x 288 Frames: 2000 Taxa de Frames: 30 Frames/s Modo de cor: Y, U, V
Fila	Drop Tail (40 ms delay)
Tamanho do Pacote	1052 bytes
Fragmentação Máxima do Pacote	1024 bytes

Para a transmissão de vídeo foi utilizada a ferramenta *Evalvid* [EVALVID, 2015], o vídeo simulado foi avaliado pela ferramenta MSU VQMT (*Video Quality Measurement Tool*) [MSU, 2015]. O vídeo utilizado na simulação foi o “*Highway*”, que possui 2000 *frames* e foi codificado com o *MPEG-4 CODEC* à uma taxa de 30 frames/s [YUV, 2015].

4.4 Política

A política visa o encaminhamento das chamadas para a rede *femtocell* até que a mesma tenha esgotado sua capacidade. Depois do esgotamento da capacidade desta rede, as chamadas são encaminhadas para a rede *macrocell*. Uma vez esgotadas as capacidades das duas redes, as chamadas são bloqueadas. A cada chamada terminada, abre-se uma vaga na rede para atender a novas chamadas. A Figura 7 apresenta um fluxograma para melhor entendimento da política.

O modelo *Markoviano* de Cardoso et al. (2012) gerou uma política que foi implementada em forma de algoritmo para ser inserido no simulador. O algoritmo genérico é representado na Tabela 8.

Tabela 11: Algoritmo Genérico da Política *Markoviana*.

```

1: chegada_chamada();
2: if (chamada == voz || chamada == dados) {
3:   if (qte_usuario_femtocell < 5){
4:     conectar_femtocell();
5:   }
6:   else if (qte_usuario_femtocell > 5 && qte_usuario_macrocell < 10) {
7:     conectar_macrocell();
8:   }
9:   else {
10:    bloquear_chamada();
11:  }
12:}

```

O passo a passo do fluxograma da Figura 7 é definido a seguir:

1. Inicia a simulação;
2. Chega uma chamada;
3. Identifica se a chama é de voz ou de dados;
4. A chamada segue para a política de voz ou de dados;
5. A rede identifica se o número de chamadas na *femtocell* é menor que cinco;
6. Se atender ao passo cinco, conecta na *femtocell*;
7. Senão, a rede identifica se o número de chamadas na *macrocell* é menor que dez;
8. Se atender ao passo sete, a chamada é conectada na *macrocell*;
9. Se a rede identificar que as quantidades de chamadas presentes na *femtocell* e *macrocell*, for igual a cinco e a dez, respectivamente, a chamada será bloqueada.
10. Finaliza o atendimento da chamada.

O algoritmo genérico da política *Markoviana* foi inserido a partir do módulo MIH (*Media Independent Handover*) adicionado ao NS-2. Este módulo será abordado na próxima seção.

4.5 Estratégia de Avaliação de Desempenho para Aplicações Multimídia

Para avaliação das aplicações multimídias, a estratégia aqui proposta se baseia especificamente em métricas de QoE, as três métricas objetivas juntas (PSNR, SSIM e VQM) conseguem abstrair informações que ajudam a perceber com maior exatidão a percepção do usuário final em relação às aplicações de vídeo. Com a utilização das ferramentas *Evalvid* [EVALVID, 2015] e MSU VQMT [MSU, 2015], torna-se possível a coleta e análise de tais métricas a partir de

uma simulação.

A estratégia utiliza esse conjunto de métricas em comparação com a métrica de QoS chamadas bloqueadas, que é o número de chamadas bloqueadas pelas redes. Tal métrica foi escolhida, pois mostrou maior impacto quando o número de usuários cresce tentando acessar as redes (*Macro/Femto*) utilizando o cenário denominado política. A estratégia consegue demonstrar que o melhor desempenho das métricas de QoE podem sacrificar as métricas de QoS.

As regras criadas para alimentar a estratégia são baseadas em condições para definir se a aplicação foi aprovada ou reprovada, e podem ser vistas no pseudocódigo a seguir (Tabela 12).

Tabela 11: Pseudocódigo da estratégia.

```

1: Se (PSNR > 25 && VQM < 0,5 && SSIM > 0,8 || PSNR > 25 && VQM < 0,5 ||
2: PSNR > 25 && SSIM > 0,8 || VQM < 0,5 && SSIM > 0,8 || SSIM = 1)
3:   Aprovado
4:   Senão
5:     Reprovado

```

São determinados valores mínimos para cada métrica de acordo com o conceito de cada uma, sendo aceitável para o PSNR valores maiores que 25, para VQM valores menores que 0,5 e para o SSIM valores maiores que 0,8.

De forma simplificada, a primeira regra verifica se as 3 métricas estão dentro dos valores aceitáveis, da segunda à quarta regra, demonstra que a aplicação é aprovada se duas das métricas forem alcançadas, a quinta e última regra é o valor máximo do SSIM que é considerado como o vídeo original. Todas as outras regras que não foram citadas anteriormente têm sua aplicação reprovada.

4.6 Considerações Finais

Com as informações presentes neste capítulo é possível criar a simulação para a coleta dos resultados usando a estratégia de avaliação de desempenho para aplicações multimídia. O cenário, a arquitetura e os parâmetros das simulações foram definidos neste capítulo, afim de possibilitar que outros pesquisadores possam repetir as simulações e coletar resultados iguais ou próximos. Este capítulo também apresentou as principais métricas de Avaliação e desempenho de QoS e QoE.

5 – RESULTADOS NUMÉRICOS

5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, serão apresentados os resultados da análise da simulação. A estratégia para avaliação de desempenho de aplicações multimídia, utilizando as métricas de QoE foi aplicada nos dois cenários propostos com variação do número de usuários. O comportamento dos dois cenários é comparado e demonstrado através de tabelas e gráficos, citando o ganho de um em relação ao outro.

5.2 Resultados de QoE

Os resultados coletados são baseados na estratégia proposta para avaliação de desempenho de aplicações multimídia, primeiro foi simulado o cenário *Macro/Femto*, os resultados podem ser vistos na Tabela 13, com a classificação feita pela estratégia apenas com 5 e 10 usuários as aplicações foram aprovadas, é importante observar que em nenhum momento a métrica VQM chegou próximo do valor aceitável, chegando a ser de aproximadamente 600% à 1870% maior.

Tabela 12: Resultados de QoE cenário *Macro/Femto*.

Nº de usuários	PSNR	SSIM	VQM	Classificação
	Macro/Femto	Macro/Femto	Macro/Femto	
5	25,36322	0,8453	3,49289	Aprovado
10	25,35357	0,84479	3,50715	Aprovado
15	23,91666	0,84267	3,5925	Reprovado
20	20,34713	0,78655	5,35941	Reprovado
25	17,81912	0,67226	7,56657	Reprovado
30	14,23458	0,59128	9,8456	Reprovado

O cenário da política também foi avaliado como o anterior e os resultados podem ser vistos na Tabela 14, neste caso a partir de 15 usuários os resultados ficaram constantes devido o balanceamento de carga da política, considerando que no máximo 15 usuários podem se conectar, os resultados ficaram dentro do esperado. Com todos os usuários o resultado foi aprovado. As métricas SSIM e PSNR se destacam com ótimos desempenhos, a primeira ficou bem próximo do valor 1, e na segunda todos os valores se encontram como excelente na escala relacionada ao MOS.

Tabela 13: Resultado de QoE cenário com Política.

Nº de usuários	PSNR Política	SSIM Política	VQM Política	Classificação
5	43,46723	0,96913	0,46854	Aprovado
10	43,44136	0,96875	0,47918	Aprovado
15	43,40876	0,96834	0,48329	Aprovado
20	43,40876	0,96834	0,48329	Aprovado
25	43,40876	0,96834	0,48329	Aprovado
30	43,40876	0,96834	0,48329	Aprovado

A estratégia avaliou as chamadas bloqueadas do cenário com política, o número de bloqueios foi muito alto, isso ocorre devido ao fato dos usuários ficarem em uma posição no cenário onde as duas células atuam e tentam se conectar a todo tempo em alguma das duas (*macrocell* ou *femtocell*), como a política determina um número máximo de usuários, quando passa desse número as chamadas são bloqueadas. A Figura 8 mostra a quantidade de chamadas bloqueadas.

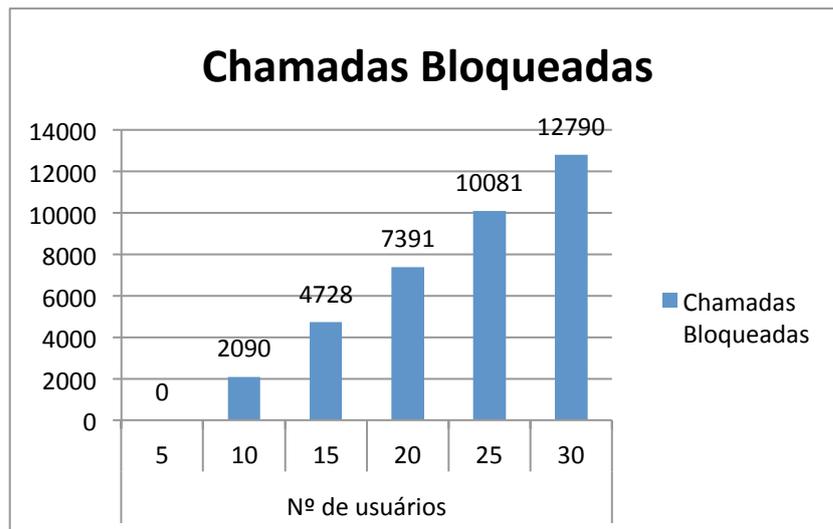


Figura 8: Chamadas bloqueadas no cenário com política.

A última avaliação feita foi a comparação das métricas de QoE nos dois cenários. A métrica PSNR na maior diferença entre os cenários, com 30 usuários, esteve com desempenho 205% melhor no cenário com política do que no *Macro/Femto*, no SSIM, o cenário com a política apresentou um resultados cerca de 39% melhor, a melhora em VQM na política foi a mais significativa chegando a ser 1937% melhor. As Figuras 9, 10 e 11 mostram os resultados em gráficos.

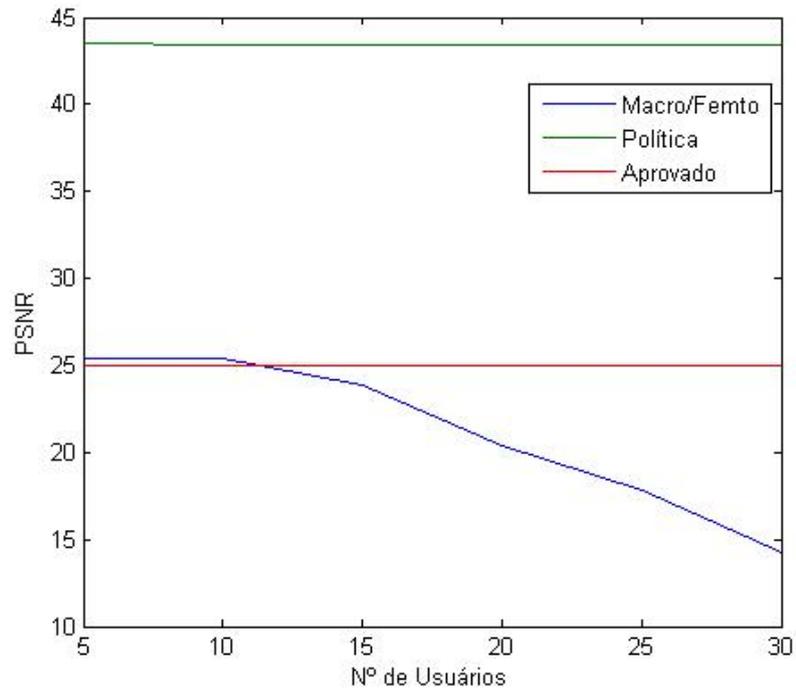


Figura 9: Gráfico PSNR.

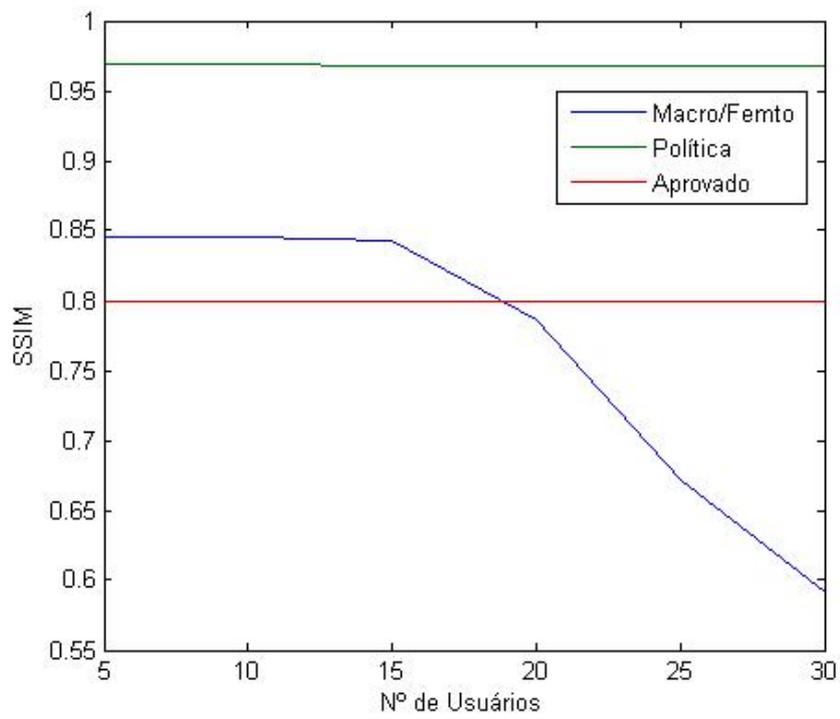


Figura 10: Gráfico SSIM.

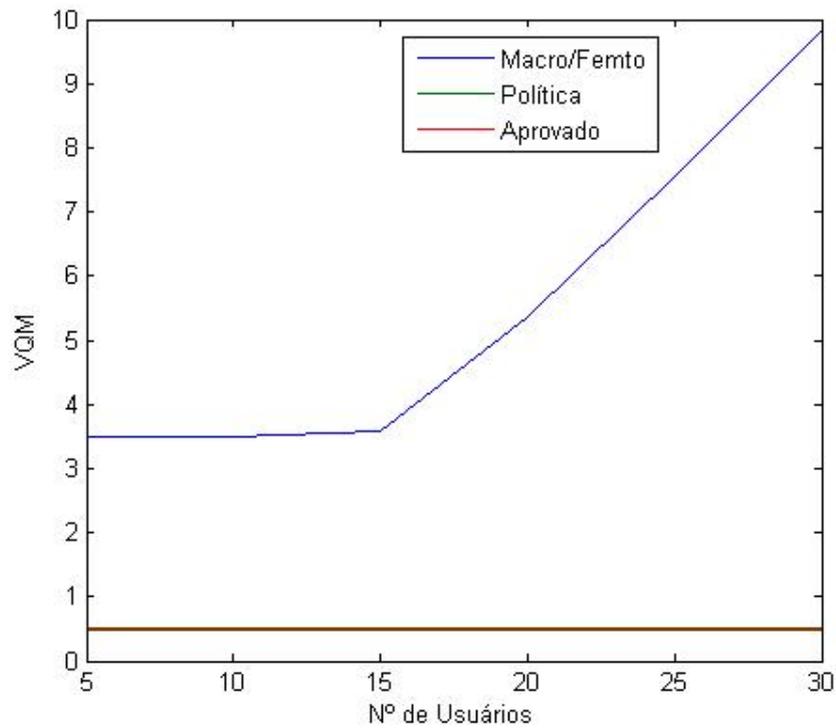


Figura 11: Gráfico VQM.

Quando os *frames* do vídeo são visualizados fica evidente que a avaliação foi adequada, na Figura 12 é mostrado o *frame* 1000 da simulação com 30 usuários, o vídeo do cenário com política, que foi aprovado pela estratégia, está com qualidade próxima ao original. No cenário *Macro/Femto* ocorreram diversos travamentos no vídeo causando atraso e perda nos *frames*.



Figura 12: Qualidade dos *Frames* com 30 usuários.

5.3 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os resultados referentes à avaliação de desempenho dos cenários aplicando a estratégia proposta, mostrando os valores das métricas de QoE e o resultado da aplicação multimídia em cada rede e comparando-os.

6 – CONCLUSÃO

6.1 Considerações Finais

O principal objetivo desta dissertação foi propor uma estratégia de planejamento e avaliação de desempenho que auxilia o processo de *handover* em redes *macrocell/femtocell* considerando os aspectos de QoE. Para validar a estratégia proposta foi utilizada uma política que leva em consideração a quantidade de usuários, e tipo de aplicação para a decisão de escolha de conectividade. O gerenciamento de mobilidade entre tecnologias diferentes é realizada nessa proposta pelo protocolo MIH, responsável pelo *handover* entre as redes *macrocell/femtocell* e vice-versa.

A estratégia de planejamento proposta considera justamente as avaliações baseadas em métricas de QoE, pelo fato de mostrarem a experiência que o usuário obtém diante de uma aplicação de vídeo. Por isso, as avaliações realizadas nesta dissertação não foram apenas utilizando as tradicionais métricas de QoS, já que, adicionalmente, expressa-se de fato a percepção do usuário diante das aplicações multimídias. Os resultados das simulações comprovaram que a estratégia proposta pode classificar os vídeos de forma objetiva e com eficiência.

Este trabalho mostrou que o padrão utilizado para *handover* (nível de sinal), não consegue dar suporte adequado quando são utilizadas aplicações de vídeo, mostrando que na medida que aumenta o número de usuários os resultados tendem a piorar chegando a resultados ruins em relação ao mínimo de qualidade esperado.

Outro ponto importante apresentado nesse trabalho foi a política utilizada no cenário com política. As simulações também comprovaram a eficácia da proposta em alocar usuários em redes *macrocell* ou *femtocell* conforme o tipo de aplicação e carga da rede. A alocação é feita de modo transparente aos usuários móveis com auxílio do MIH garantindo que independente da conexão escolhida pela proposta que os requisitos de QoE sejam satisfeitos.

6.2 Contribuições da Dissertação

As principais contribuições desta proposta, segundo a percepção dos autores, são:

- Proposição de uma estratégia de planejamento e avaliação de desempenho para redes *macrocell/femtocell*;

- Elaboração de gerenciamento de mobilidade vertical transparente com uso do padrão IEEE 802.21;
- Implementação de mecanismo de escolha de conectividade considerando a carga da rede e tipo de aplicação;
- Criação de cenários para simulação utilizando *macrocell* e *femtocell*;
- Realização de simulações com uso de aplicações de vídeos;
- Uso de métricas objetivas de QoE para avaliação de desempenho;
- Criação de uma estratégia para avaliação de aplicações multimídia;

6.3 Trabalhos Futuros

Podem ser destacados como trabalhos futuros e desdobramentos a partir desta dissertação:

- Adição de novas tecnologias à proposta para ampliar as oportunidades de conectividade aos usuários móveis;
- Realização de testes subjetivos de avaliação da qualidade de experiência com os usuários para aferição com os resultados obtidos.;
- Execução de simulações de vídeo de alta definição (*High Definition*);
- Realização de estudos da influência da métricas de QoS diante das de QoE

6.4 Dificuldades Encontradas

Durante o desenvolvimento da dissertação, foram encontradas dificuldades que são listadas com o intuito de auxiliar a condução de novos estudos nesta mesma linha de pesquisa. Entre as principais dificuldades podem ser citadas:

- A dissertação abrangeu várias linhas de pesquisas, requerendo um estudo detalhado sobre tecnologias de acesso sem fio e sobre simuladores de eventos discretos;
- O estudo sobre as tecnologias *macrocell* e *femtocell* realizado por simulação já que por uma questão de custos financeiros não foi possível adquirir equipamentos para *testbeds*;
- Um estudo aprofundado sobre a ferramenta de simulação de evento discreto e conseqüentemente um estudo aprofundado em linguagens de programação para que fosse possível o desenvolvimento da proposta;
- A repetição de quantidade de simulações causando um grande consumo de tempo de

execução e também gerando uma grande quantidade de dados a serem filtrados para que se chegasse a um resultado final.

6.5 Publicações

- NATAL, I. P. ; CARDOSO, J. A. S. ; SILVA, Marcelino Silva da; FERREIRA JUNIOR, J. J. H. ; SANTANA, Á. L. ; CARDOSO, Diego Lisboa ; FRANCÊS, C. R. L. **Green Markov - Uma abordagem híbrida de Política Markoviana e Simulação Discreta para Planejamento de Alocação de Usuários em Redes Macro/Femto.** Publicado no WPerformance: XIII Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação, Brasília (Brasil), 2014 (*short paper*).
- NATAL, I. P. ; CARDOSO, J. A. S. ; SILVA, Marcelino Silva da; FERREIRA JUNIOR, J. J. H. ; SANTANA, Á. L. ; CARDOSO, Diego Lisboa ; FRANCÊS, C. R. L. ***Performance evaluation of a Markovian Policy For Macro/Femto User Allocation considering aspects of QoS, QoE and Energy Efficiency.*** Aceito para publicação no Journal of Communication and Computer, ISSN: 1548-7709 (full paper).

REFERÊNCIAS

3GPP TS 136.300 V8.12.0, “*Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN). Overall Description; Stage 2. (Release 8)*”, 2010, Disponível em http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136300/08.12.00_60/ts_136300v081200p.pdf Acesso em 15 de dezembro de 2014.

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações. Disponível em <http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalPaginaEspecialPesquisa.do?acao=&tipoConteudoHtml=1&codNoticia=32359>. Acesso em 15 de dezembro de 2014.

ANDREWS, J. G. ; CLAUSSEN, H. ; DOHLER, M. ; RANGAN, S. “*Femtocells: Past, Present, and Future*”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 30, No. 3, p.497-508, Abr, 2012.

BOULHOSA, R. ; CARVALHO, T. ; JAILTON JÚNIOR, J. PASSOS, DIEGO ; DIAS, K. L. ; CERQUEIRA E. “Gerenciamento de Handover Transparente com Suporte Integrado a QoS/QoE em Redes Heterogêneas”, X Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação, p.2019-2032, 2011.

BROOKS, P. ; HESTNES, B. “*User measures of quality of experience: why being objective and quantitative is important*”, *IEEE Network*, Vol 24, No. 2, p.8-13, Abr, 2010.

CARDOSO, D. L. ; SANTANA, A. L. ; SILVA, M. S. DA ; FRANCÊS, C. R. L. ; COSTA, J. C. W. A. “*Green-Makov models – new optimization strategies: a case study for user allocation in co-channel macro/femto networks*”, *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMoe)*, Vol. 11, No. 2, p.269-284, Dez, 2012.

CHANDRASEKHAR, V. ; ANDREWS J. G. “*Femtocell Networks: A survey*”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 46, No. 9, p.59-67, Set, 2008.

CHERIF, W. ; KSENTINI, A. ; NEGRU, D. ; SIDIBE, M. “*A_PSQA: Efficient real-time video*

streaming QoE tool in a future media internet context”, *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, p.1-6, 2011.

CISCO VISUAL NETWORKING INDEX. Disponível em <http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.html>. Acesso em 15 de dezembro de 2014.

CLAUSSEN, H. ; HO, L. T. W. ; SAMUEL, L. G. “*An overview of the femtocell concept*”, *Bell Labs Technical Journal*, Vol. 13, No. 1, p.221-245, Mai, 2008.

COSTA, A. B. “*Avaliação da Tecnologia Femtocell como Canal de Retorno para TV Digital*”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal do Pará (UFPA), 2013.

DAHLMAN E. ; PARKVALL, S ; SKOLD, J. “*4G LTE/LTE – Advanced for Mobile Broadband*”, Editora *Academic Press*, 544p., Mai, 2011.

DAMNJANOVIC, A. ; MONTOJO, J. ; YONGBIN, W. ; TINGFANG, J. ; LUO T. ; VAJAPAYAM, M. ; YOO T. ; SONG, O. ; MALLADI, D. “*A Survey on 3GPP Heterogeneous Networks*”, *IEEE Wireless Communications*, Vol. 18, No. 3, p.10-21, Jun, 2011.

EVALVID. Disponível em <<http://www2.tkn.tu-berlin.de/research/evalvid/fw.html>>. Acesso em 12 de Janeiro de 2015.

FALLAHI, A. ; HOSSAIN, E. “*QoS provisioning in wireless video sensor networks: a dynamic power management framework*”, *IEEE Wireless Communications*, Vol. 14, No. 6, p.40-49, Dez, 2007.

FEMTO FÓRUM. Disponível em <<http://www.femtoforum.org/femto/index.php>>. Acesso em 10 de Julho de 2014.

FERREIRA JÚNIOR, J. J. H. “*Predição de Qualidade de Experiência Para Internet do Futuro em Arquiteturas Heterogêneas em Redes Sem Fio Móveis*”, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal do Pará

(UFPA), 2013.

FERRUS, R. ; GELONCH, A. ; CASADEVALL, F. ; REVES, X. ; NAFISI, N. “*EVEREST testbed: QoS management evaluation in B3G networks*”, *International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities*, p.31-36, 2006.

GHOSH, A. ; RATASUK, R. ; MONDAL, B. ; MANGALVEDHE, N. ; THOMAS, T. “*LTE-advanced: next-generation wireless broadband technology*”, *IEEE Wireless Communications*, Vol. 17, No. 3, p.10-22, Jun, 2010.

HEIDARINEZHAD, M. R. ; MIRHOSEINI, M. ; KHOSRAVI, H. ; KAZEMI, A. “*A Connection Selection Method and Vertical Handoff in Hybrid Wireless Environment*”, *International Conference on Future Networks*, p.161-165, 2009.

HONG, D. ; RAPPAPORT S. S. “*Traffic model and performance analysis for cellular mobile radio telephone systems with prioritized and nonprioritized handoff procedures*”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 35, No. 3, p.77-92, Jan, 1986.

HUANG, C. ; HU, K. ; CHEN, I. ; CHEN, Y. ; CHEN, H. “*An intelligent resource management scheme for heterogeneous WiFi and WiMAX multi-hop relay networks*”, *Elsevier Expert Systems with Applications*, Vol. 37, No. 2, p.1134-1142, Mar, 2010.

ITU-R Recommendation BT.500-7 “*Methodology for the Subjective Assessment of the Quality of Television Pictures*”, Relatório Técnico, 1990.

ITU-T. E.800 (09/08), “*Definitions of terms related to quality of service*”, 2008, disponível em <<http://www.itu.int/rec/T-REC-E.800-200809-I/en>>. Acesso em 12 de Janeiro de 2015.

JAIN, R. “*Quality of Experience*”, *IEEE MultiMedia*, Vol. 11, No. 1, p.95-96, Mar, 2004.

JAIN, R. “*The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling*”, Editora Wiley, 720p., Abr, 1991.

KASSAR, M. ; KERVELLA, B. ; PUJOLLE, G. “*An overview of vertical handover decision*

strategies in heterogeneous wireless networks”, *Elsevier Computer Communications*, Vol. 31, No. 10, p.2607-2620, Jun, 2008.

KIM, J. Y. ; CHO, D. H. “*A joint power and subchannel allocation scheme maximizing system capacity in dense femtocell downlink system*”, *IEEE International Symposium on Personal , Indoor and Mobile Radio Communications*, p.1381-1385, 2009.

KIM, R. Y. ; KWAK, J. S. ; ETERMAD, K. “*WiMAX femtocell: requirements, challenges , and solutions*”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 47, No. 9, p.84-91, Out, 2009.

KONG, P. “*Optimal Probabilistic Policy for Dynamic Resource Activation Using Markov Decision Process in Green Wireless Networks*”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 13, No. 10, p.2357-2368, Fev, 2014.

KOROWAJCZUK, L. “*LTE, WiMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis*”, Editora Wiley, 782p, Ago, 2011.

LEE, T. ; YOON, J. ; LEE, S. ; SHIN, J. “*Resource allocation analysis in OFDMA femtocells using Fractional Frequency Reuse*”, *IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*, p.1224-1229, 2010.

LIN, C. ; SANDRASEGARAN, K. ; RAMLI, H. A. M. ; BASUKALA, R. “*Optimized Performance Evaluation of LTE Hard Handover Algorithm with Average RSRP Constraint*”, *International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN)*, Vol. 3, No. 2, p.1-16, Abr, 2011.

MALKOWSKI, M. ; CLABEN, D. “*Performance of Video Telephony Services in UMTS using Live Measurements and Network Emulation*”, *Wireless Personal Communications: An International Journal*, Vol. 46, No. 1, p.19-32, Jul, 2008.

MSU. Disponível em http://compression.ru/video/quality_measure/video_measurement_tool_en.html. Acesso em 12 de Janeiro de 2015.

NETWORK SIMULATOR – NS-2. Disponível em <http://www.isi.edu/nsnam/ns>. Acesso em 10

de Janeiro de 2015.

NETWORK SIMULATOR – NS-3. Disponível em <<http://www.nsnam.org/overview/key-technologies>>. Acesso em 10 de março de 2015.

NKANSAH-GYEKYE, Y. ; AGBINYA, I. “*A Vertical Handoff Decision Algorithm for Next Generation Wireless Networks*”, *International Conference on Broadband communications, Information Technology & Biomedical Applications*, p.358-364, 2008.

OLSSON, M. ; ROMMER, S. ; MULLIGAN, C. ; SULTANA, S. ; FRID, L. “*SAE and the Evolved Packet Core: Driving the Mobile Broadband Revolution*”, Editora: *Academic Press*, 464p., Ago, 2009.

OPNET Modeler “*Application and Network Performance*”. Disponível em <<http://www.opnet.com>>. Acesso em 10 de março de 2015.

PIDD, M. “*Computer Simulation and Management Science*”, Editora Wiley 5ª Edição, 332p., Abr, 2006.

PIRO, G. ; GRIECO, L. A. ; BOGGIA, G. ; CAPOZZI, F. ; CAMARDA, P. “*Simulating LTE Cellular Systems: An Open-Source Framework*”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 60, No. 2, p.498-513, Fev, 2011.

SÁ, S. R. “*Algoritmo para Desenvolver uma Ferramenta de Planejamento para o Sistema de Comunicações Móveis LTE*”, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática), Departamento de Ciências e Tecnologias da Informação, Instituto Universitário de Lisboa, Lisboa, 2011.

SALEM, A. B. ; REGUIGA, K. S. B. “*Toward Green Mobility in Femtocell Networks*”, *International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, p.488-492, 2013.

SESLIA, S. ; TOUFIK, I. ; BAKER, M. “*LTE: The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*”, Editora Wiley, 792p., Ago, 2011.

SHE, J. ; HOU, F. ; HO, P. H. ; XIE L. L. “*IPTV over WiMAX: Key Success Factors, Challenges , and Solutions [Advances in Mobile Multimedia]*”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 45, No. 8, p.87-93, Ago, 2007.

SILVA, K. “Uma Abordagem para Análise do Impacto da Utilização de *Femtocells* em um Cenário LTE – Estudo de Caso em Simulação Discreta”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal do Pará (UFPA), 2014.

SILVA, D. P. ; FERREIRA JÚNIOR, J. J. ; COELHO, M. B. S. ; DIAS, K. L. “Arquitetura Heterogênea com Gerenciamento da QoE e Suporte a Handover Transparente através de um Sistema Fuzzy-Genético”, XVI Simpósio Brasileiro de Sistemas Multimídias e Web, p.3-10, 2010.

SOUZA, C. R. A. “Eficiência energética e espectral em redes sem fio macro-celulares: caracterização, otimização e análise de compromisso”, Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação), Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Estadual de Londrina (UEL), 2013.

TAKAHASHI, A. ; HANDS, D. ; BARRIAC, V. “*Standardization activities in the ITU for a QoE assessment of IPTV*”, *IEEE Communication Magazine*, Vol. 46, No. 2, p.78-84, Mar, 2008.

TAKAHATA K. ; UCHIDA, N. ; SHIBATA, Y. “*QoS control for real time video stream over hybrid network by wired and wireless LANs*”, *17th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, p.45-51, 2003.

TOTAL TELECOM “*Vodafone sells indoor coverage with UK femto launch*”. Disponível em <<http://www.totaltele.com/view.aspx?ID=446640&mail=31>>. Acesso em 21 de dezembro de 2014.

UEMURA, S. ; FUKUMOTO, N. ; YAMADA, H. ; NAKAMURA, H. “*QoS/QoE Measurement System Implemented on Cellular Phone for NGN*”, *IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, p.117-121, 2008.

UNIÃO

EUROPEIA.

Disponível

em

<<http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/08/1998>>. Acesso em 15 de dezembro de 2014.

VENKATARAMAN, M. ; SENGUPTA, S. ; CHATTERJEE, M. ; NEOGI, R. “*Towards a Video QoE Definition in Converged Networks*”, *Second International Conference on Digital Telecommunications*, p.16-22, 2007.

VQEG “*Video Quality Experts Group*”. Disponível em <<http://www.its.bldrdoc.gov/vqeg>>. Acesso em 15 de dezembro de 2014.

WANG, X. ; ATHANASIOS, V. V. ; CHEN, M. ; LIU, Y. ; KWON, T. T. “*A Survey of Green Mobile Networks: Opportunities and Challenges*” *ACM/Springer Mobile Networks & Applications*, Vol. 17, No. 1, p.4-20, Fev, 2012.

WANG, Z. ; LU, L. ; BOVIK, A. C. “*Video Quality Assessment Based on Structural Distortion Measurement*”, *Signal Processing: Image Communication*, Vol. 19, No. 2, p.121-132, Fev. 2004.

WINKLER, S. “*Perceptual Video Quality Metrics – A Review*”, *Digital Video Image Quality and Perceptual Coding* (Capítulo 5), p.155-179, 2005.

YANG, Y. ; HU, H. ; XU, J. ; MAO, G. “*Relay technologies for WiMax and LTE-advanced mobile systems*”, *IEEE Communications Magazine*, Vol 47, No. 10, p.100-105, Out, 2009.

YUV *Video Sequences*. Disponível em <<http://trace.eas.asu.edu/yuv>>. Acesso em 12 de Janeiro de 2015.

ZHENG, H. ; WANG, S. ; COPELAND, J. A. “*QoS constrained resource allocation for multimedia wireless networks*”, *IEEE Vehicular Technology Conference*, Vol. 2, p.917-923, Set, 2000.