



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

JORGE AMARO DE SARGES CARDOSO

GREEN MARKOV: UMA ABORDAGEM HÍBRIDA DE POLÍTICA
MARKOVIANA E SIMULAÇÃO DISCRETA PARA
PLANEJAMENTO DE ALOCAÇÃO DE USUÁRIOS EM REDES
MACRO-FEMTO

DM: 30/2014

UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2014



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

JORGE AMARO DE SARGES CARDOSO

GREEN MARKOV: UMA ABORDAGEM HÍBRIDA DE POLÍTICA
MARKOVIANA E SIMULAÇÃO DISCRETA PARA
PLANEJAMENTO DE ALOCAÇÃO DE USUÁRIOS EM REDES
MACRO-FEMTO

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, com ênfase em Computação Aplicada, sob orientação do Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês.

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

2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Cardoso, Jorge Amaro de Sarges, 1985-

Green markov: uma abordagem híbrida de política markoviana e simulação discreta para planejamento de alocação de usuários em redes macro-femto / Jorge Amaro de Sarges Cardoso. - 2014.

Orientador: Carlos Renato Lisboa Francês;

Coorientador: Diego Lisboa Cardoso.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2014.

1. Sistemas de comunicação sem fio. 2. Dispositivos de redes sem fio. 3. Markov, processo de. I. Título.

CDD 22. ed. 621.38456



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

**GREEN MARKOV: UMA ABORDAGEM HÍBRIDA DE POLÍTICA
MARKOVIANA E SIMULAÇÃO DISCRETA PARA
PLANEJAMENTO DE ALOCAÇÃO DE USUÁRIOS EM REDES
MACRO-FEMTO**

AUTOR: JORGE AMARO DE SARGES CARDOSO

Dissertação de mestrado submetida à avaliação da banca examinadora aprovada pelo colegiado do programa de pós-graduação em engenharia elétrica da Universidade Federal do Pará e julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, com ênfase em computação aplicada.

APROVADA EM: 31/10/2014

Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês - UFPA
ORIENTADOR

Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso - UFPA
CO-ORIENTADOR

Prof. Dr. Ádamo Lima de Santana - UFPA
MEMBRO PPGEE/UFPA

Prof. Dr. Marcelino Silva da Silva - UFPA
MEMBRO-EXTERNO UFPA-CASTANHAL

Visto:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
COORDENADOR DO PPGEE/ITEC/UFPA

AGRADECIMENTOS

Gostaria, primeiramente, de agradecer a Deus, por tudo que tem me proporcionado. Agradeço também à minha mãe, à minha irmã e a meus sobrinhos, pelo amor e apoio.

Agradeço também à minha esposa e à minha filha, pelo amor, amizade, incentivo, conselhos, companheirismo, paciência e força durante esse ciclo de vida.

Ao meu co-orientador e amigo Carlos Renato Francês, pelo ensinamento e acolhimento durante o mestrado. Agradeço pela ajuda em todos os momentos, por acreditar no meu potencial, pelas dúvidas tiradas e por ser um exemplo de profissional a ser seguido.

Agradeço ao meu orientador Diego Lisboa Cardoso, pela dedicação e paciência ao longo desse mestrado, pelas ideias e conhecimentos repassados com sabedoria a mim para os desenvolvimentos dos testes, simulações e produções de artigos. Obrigado pelas correções dos artigos e dissertação que contribuíram para a finalização deste trabalho.

Ao Professor José Jailton, pelos ensinamentos de simulação, por também estar sempre disponível para tirar as dúvidas que surgiram durante o processo de aprendizagem. Obrigado também pelas correções e contribuições nos artigos e na dissertação.

Agradeço ainda ao LPRAD. Em especial aos membros desse laboratório: Delson, Eulália, Igor, Jailton, Ketyllen, Priscila e Tássio, pela amizade e boa convivência. Agradeço também aos professores Marcelino Silva, Marcos Seruffo e ao Patrick Laves, pelas correções e considerações nos artigos.

Aos professores Dionne Monteiro (UFPA), Fernando Farias (UFPA) e Polyana Nascimento (CESUPA) pela carta de recomendação.

Aos professores do PPGEE e aos demais que contribuíram com minha formação, não só com instrução técnica, mas com princípios que substancialmente se fizeram e se fazem importantes para a minha formação.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

À Universidade Federal do Pará, pela oportunidade dada a mim para a realização desta dissertação.

“E tudo quando pedirdes em meu nome eu o farei, para que o Pai seja glorificado no Filho.

Se pedirdes alguma coisa em meu nome, eu o farei.”

João 14:13-14

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XI
RESUMO.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivo Geral.....	17
1.2 Objetivo Especifico.....	18
1.3 Organização da Dissertação.....	18
CAPÍTULO 2 – TECNOLOGIAS DE REDES SEM FIO.....	20
2.1 Considerações Iniciais.....	20
2.2 Redes de Telefonia Móveis.....	20
2.3 <i>Femtocell</i>	23
2.3.1 Padronização.....	24
2.3.2 Principais Características.....	25
2.3.3 Arquitetura da Rede Femtocell.....	26
2.3.4 Alocação de Canais de Frequência.....	27
2.3.5 Controle de Acesso.....	28
2.3.6 Mobilidade.....	28
2.3.7 <i>Backhaul</i>	29
2.3.8 Interferência.....	30
2.4 Modelos de Baterias.....	31
2.4.1 Modelo Linear.....	32
2.4.2 Modelo Rakhmatov - Vrudhula.....	33
2.5 Considerações Finais.....	34
CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	35
3.1 Considerações Iniciais.....	35
3.2 <i>Media Independent Handover (MIH)</i>	35
3.3 Qualidade de Serviço (QoS).....	36
3.4 Qualidade de Experiência (QoE).....	37
3.4.1 Avaliação Subjetiva.....	38
3.4.2 Avaliação Objetiva.....	38
3.4.3 <i>Peak Signal to Noise Ratio (PSNR)</i>	39
3.4.4 <i>Structural Similarity Index (SSIM)</i>	40
3.4.5 <i>Video Quality Metric (VQM)</i>	41
3.5 Considerações Finais.....	42
CAPÍTULO 4 – AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS.....	43
4.1 Considerações Iniciais.....	43
4.2 Avaliação de Desempenho.....	43
4.3 Métricas.....	44
4.4 Aferição.....	45
4.5 O Processo de Modelagem.....	46
4.6 Solução por Modelagens Analíticas.....	47
4.7 Solução de Modelagem por Simulação.....	47
4.7.1 Simulação.....	48
4.7.2 <i>Network Simulator 2 (NS-2)</i>	49
4.8 Considerações Finais.....	50
CAPÍTULO 5 – TRABALHOS RELACIONADOS.....	51

5.1	Considerações Iniciais.....	51
5.2	Levantamento de Trabalhos Considerados mais Relevantes.....	51
5.3	Considerações Finais.....	54
CAPÍTULO 6 – METODOLOGIA.....		55
6.1	Considerações Iniciais.....	55
6.2	Simulador de Redes.....	55
6.3	Estrutura da Rede.....	56
6.4	Cenários.....	58
6.5	Política.....	58
6.6	Parâmetros da Simulação.....	60
6.1	Considerações Finais.....	61
CAPÍTULO 7 – RESULTADOS.....		62
7.1	Considerações Iniciais.....	62
7.2	Avaliação do Consumo de Bateria e das Métricas de QoS.....	62
7.3	Avaliação de QoE.....	63
7.4	Considerações Finais.....	66
CAPÍTULO 8 – CONCLUSÃO.....		67
8.1	Considerações Finais.....	67
8.2	Contribuições da Dissertação.....	67
8.3	Trabalhos Futuros.....	68
8.4	Dificuldades Encontradas.....	69
REFERÊNCIAS.....		70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3G	Terceira Geração de Telefonia Móvel
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
4G	Quarta Geração de Telefonia Móvel
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone Service</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
BS	<i>Base Stations/Estação Base</i>
BSC	<i>Base Station Controlers</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CO₂	Dióxido de Carbono ou Gás Carbônico
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
EDGE	<i>Enhanced Data Rate for GSM Evolution</i>
ENodeB	<i>Enhanced NodeB</i>
ERB	Estação Rádio Base
GGSN	<i>Gateways GPRS Support Node</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile</i>
HNB	<i>Home NodeB</i>
HSCSD	<i>High Speed Circuit Switched Data</i>
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
HSM	<i>HNB Management System</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPTV	<i>Internet Protocol Television</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	<i>Long Term Evolution Advanced</i>
MIH	<i>Media Independent Handover</i>
MOS	<i>Mean Opinion Score</i>
MS	Mobile Stations/Estação Móvel
MSI	<i>Mean Squared Error</i>
NS-2	<i>Network Simulator 2</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>

OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
OTCL	<i>Object-Oriented Tool Command Language</i>
PMD	Processo Markoviano de Decisão
PMDTC	Processo Markoviano de Decisão a Tempo Contínuo
PMDTD	Processo Markoviano de Decisão a Tempo Discreto
PSMD	Processo Semi-Markoviano de Decisão
PSNR	<i>Peak Signal to Noise Ratio</i>
QoE	Qualidade de Experiência
QoS	Qualidade de Serviço
RNC	<i>Radio Network Controller</i>
SCM	Serviço de Comunicação Multimídia
SeGW	<i>Security Gateway</i>
SGSN	<i>Serving GPRS Support Node</i>
SME	Serviço Móvel Especializado
SMP	Serviço Móvel Pessoal
SSIM	<i>Structural Similarity Index</i>
SVH	Sistema Visual Humano
TACS	<i>Total Access Communication System</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
VINT	<i>Virtual InterNetwork Testbed</i>
VQEG	<i>Video Quality Experts Group</i>
VQM	<i>Video Quality Metric</i>
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Arquitetura rede GPRS.....	21
Figura 2. Relação entre coberturas de células de redes móveis.....	24
Figura 3. Arquitetura E-UTRAN com implantação de HeNB-GW.....	25
Figura 4. Esquema básico da rede <i>femtocell</i>	26
Figura 5. Modos de acesso em redes <i>femtocell</i>	28
Figura 6. Tipos de interferência.....	30
Figura 7. Estado de operação da bateria.....	32
Figura 8. Arquitetura do módulo MIH.....	35
Figura 9. Técnicas de avaliação de desempenho.....	44
Figura 10. Etapas do processo de modelagem.....	46
Figura 11. Fluxograma da metodologia proposta.....	55
Figura 12. Cenário <i>macrocell</i> e <i>femtocell</i> que está sendo levado em consideração.....	57
Figura 13. Fluxograma da política.....	59
Figura 14. Gráfico do consumo de bateria.....	62
Figura 15. PSNR.....	64
Figura 16. SSIM.....	64
Figura 17. VQM.....	65
Figura 18. <i>Frame 28</i> : cenário <i>macrocell</i>	65
Figura 19. <i>Frame 28</i> : cenário <i>femtocell</i>	65
Figura 20. <i>Frame 28</i> : cenário política.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características das Principais Tecnologias Celular.....	22
Tabela 2. Principais Métricas de QoS.....	37
Tabela 3. Escala de Qualidade MOS.....	38
Tabela 4. Mapeamento PSNR para MOS.....	40
Tabela 5. Cenários Testados.....	58
Tabela 6. Algoritmo Genérico da Política Markoviana.....	59
Tabela 7. Parâmetros da <i>Macrocell</i> e <i>Femtocell</i>	60
Tabela 8. Parâmetros das Aplicações Voz e Dados.....	60
Tabela 9. Parâmetros da Simulação com Vídeo.....	61
Tabela 10. Medidas de Desempenho (Médias).....	63

RESUMO

O uso da comunicação de voz e dados através de dispositivos móveis vem aumentando significativamente nos últimos anos. Tal expansão traz algumas dificuldades inerentes, tais como: ampliação constante de capacidade das redes e eficiência energética. Neste contexto, vem se consolidando o conceito de *Green networks*, que se concentra no esforço para economia de energia e redução de CO₂. Neste sentido, este trabalho propõe validar um modelo de uma política baseado em processo markoviano de decisão, visando a otimizar o consumo de energia, QoS e QoE, na alocação de usuários em redes *macrocell* e *femtocell*. Para isso o modelo foi inserido no simulador NS-2, aliando a solução analítica markoviana à flexibilidade característica da simulação discreta. A partir dos resultados apresentados na simulação, a política obteve uma economia significativa no consumo energético, melhorando a eficiência energética em até 4%, além de melhorar a qualidade de serviço em relação às redes *macrocell* e *femtocell*, demonstrando-se eficaz, de modo a alterar diretamente as métricas de QoS e de QoE.

Palavras-Chave: *Femtocell*, *Macrocell*, Markov, *Green networks*, Qualidade de Serviço, Qualidade de Experiência.

ABSTRACT

The use of voice and data communication via mobile devices has increased significantly in recent years. This expansion brings some difficulties such as: continuous expansion of network capacity and energy efficiency. In this context, has been consolidating the concept of *Green Networks*, which focuses on the effort to energy saving and CO₂ reduction. Thus, this paper proposes validate a model of a policy based on Markov decision process to optimize energy consumption, QoS and QoE, in the allocation of macrocell and femtocell users in networks. For this the model was inserted into the network simulator NS-2, combining the Markov analytical solution to the characteristic flexibility of discrete simulation. From the results presented in the simulation, the policy obtained significant savings in energy consumption, improving energy efficiency by up to 4%, and improve the quality of service in relation to the macrocell and femtocell networks, demonstrating effective in order to directly change the metrics of QoS and QoE.

Keywords: Femtocells, Macrocell, Markov, Green Networks, Quality of Service, Quality of Experience.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A demanda crescente por novas tecnologias, serviços e conteúdos estão alterando a forma como os usuários acessam a Internet. Devido à flexibilidade oferecida pelas redes sem fio, as operadoras estão sendo obrigadas a fornecer serviços com elevada taxa de transmissão e qualidade para um número cada vez maior de usuários móveis. Este fato tem se tornado realidade devido à popularização de equipamentos com interface sem fio, tais como: *notebooks*, *smartphones* e *tablets*. Segundo pesquisas da CISCO (2014) quanto a introspecções quantitativas, até 2016 o tráfego global IP (*Internet Protocol*) irá crescer quatro vezes, alcançando um marco de 7 exabytes (10^{18} bytes) mensalmente. 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 duas e meia conexões para cada pessoa na Terra. Entre as aplicações IP, as comunicações de vídeo: vídeo sob demanda, IPTV (*Internet Protocol Television*), videoconferência, videovigilância, etc. serão 14 vezes maiores do que a demanda atual.

Há dois grupos de tecnologias de acesso: redes cabeadas e sem fio. Nas redes cabeadas, o material constituinte do cabeamento limita a vazão que pode ser alcançada pelo usuário final. Já o grupo das redes sem fio não apresenta conexão física e está gradualmente emergindo como um padrão para aplicações de primeira milha; produz uma gama de disponibilidades de largura de banda, dependentes da qualidade da rede sem fio, caracterizada, por exemplo, pela interferência de ruídos e pela distância do usuário para a estação base.

Atualmente, o custo associado à implantação de sistemas celulares é elevado e, ironicamente, estas redes possuem problemas de cobertura em ambiente *indoor*. Além disso, pesquisas mostram que mais de 50% das ligações que se utilizam da conexão sem fio e mais de 70% do tráfego de dados são originados de um ambiente *indoor* (CHANDRASEKHAR & ANDREWS, 2008). A infraestrutura atual possui um bom desempenho para o tráfego de voz; no entanto, como o perfil de utilização de serviços, por parte dos usuários, está mudando e a utilização do tráfego de dados está crescendo, essa infraestrutura não consegue atender satisfatoriamente à nova demanda.

Há várias abordagens que podem ser utilizadas para atender à demanda por altas taxas de dados. As principais opções para expandir a capacidade da rede incluem: melhorar o desempenho das *eNodeBs* (*enhanced NodeB (macrocells)*) e complementar a rede com nós de baixa potência, criando assim uma rede heterogênea (DAMNJANOVIC et al., 2011). O

surgimento de novas tecnologias de acesso por rádio móvel como: HSPA (*High Speed Packet Access*), LTE (*Long Term Evolution*) e LTE-A (*Long Term Evolution – Advanced*) permite taxas de dados mais elevadas e melhoria da capacidade do sistema. Complementar as *macrocells* com os nós de baixa potência tais como *picocells* e *femtocells*, é uma das soluções mais aceitas (DAMNJANOVIC et al., 2011). O 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) define uma variedade de tipos de nó de baixa potência e suporte de recursos para permitir aumento da capacidade das redes de 4ª geração (3GPP, 2014a). Para melhorar a capacidade e cobertura do serviço é essencial que nós de baixa potência absorvam parte do tráfego das *macrocells*, principalmente em ambientes *indoor*.

Uma das soluções utilizadas tem sido diminuir cada vez mais o raio de cobertura da célula, aumentando quantidade de células e por fim a capacidade da rede. Neste contexto surgiram as *femtocells* (CLAUSSEN et al., 2008).

As redes *femtocell* tem um forte potencial para melhorar a capacidade dos sistemas sem fio de próxima geração, uma vez que oferecem melhores qualidades de *link* para os usuários conectados. Os pontos de acesso *femtocell* são normalmente instalados por usuários não-especialistas. Dessa forma, no instante da instalação não são consideradas características de desempenho da rede, uma vez que basta conectar um ponto de acesso a um DSL (*Digital Subscriber Line*) e ligá-lo. O ponto de acesso auto-organiza seus parâmetros operacionais de rádio e de sistema. Essa adversidade se torna mais complexa quando o consumo da bateria de nós clientes e os requisitos de QoS (Qualidade de Serviço) são considerados para decidir a qual célula eles devem se conectar. Tradicionalmente, a decisão é tomada com base no sinal recebido pelo utilizador móvel (ligação na célula com maior poder de sinal, quer seja uma célula *macrocell* quer seja uma *femtocell*), sem considerar se a saída satisfaz os requisitos mínimos de QoS (ERTÜRK et al., 2010).

A QoS, que é o outro ponto abordado na literatura e que é constantemente é aplicado à problemática dos sistemas de telefonia, é o provimento de qualidade aos usuários. A QoS de uma rede é garantida pelos componentes e equipamentos nela utilizado, estando baseada em um mecanismo fim-a-fim para garantir a entrega das informações que deve atuar na comunicação dos equipamentos envolvidos visando ao controle dos parâmetros de Qualidade de Serviço. O impacto da degradação sobre os fluxos de dados pode ser trivial, quando ele não é percebido pelos usuários finais. Entretanto, devido às limitações das tradicionais métricas de QoS sobre a avaliação de aplicativos multimídias em nível de usuário, foram introduzidas novas métricas de QoE (Qualidade de Experiência).

A qualidade do serviço oferecido ao usuário final será um fator decisivo para o sucesso dos provedores de acesso. Atualmente, muitos provedores de acesso realizam suas políticas de decisão de alocação de recursos e controle da qualidade com base em parâmetros tradicionais de QoS. No entanto, o desempenho das aplicações multimídia e o provisionamento de QoS em termos de vazão, atraso, *jitter* e perda já foram bastante estudados em vários trabalhos envolvendo tanto redes cabeadas (TAKAHATA et al., 2005) quanto redes sem fio (FALLAHI & HOSSAIN, 2007) e (ZHENG et al., 2000), servindo atualmente somente como um indicador do desempenho esperado do serviço fornecido e não em relação à percepção que o usuário final tem da aplicação.

Com o intuito de resolver as limitações das técnicas tradicionais de controle de qualidade e desempenho da rede, no que diz respeito à percepção humana e aos aspectos subjetivos relacionados a conteúdos multimídia, uma nova abordagem vem sendo estudada, baseada em métricas de QoE. As operações referentes ao controle de recursos da rede e inclusive mobilidade baseadas em métricas de QoE podem ser usadas para configurar e medir elementos de rede de forma a otimizar os recursos e garantir uma melhor percepção do conteúdo por parte dos usuários finais. Vários pesquisadores e organizações, como: ITU-T, *International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector*, (cf. ITU-R *Recommendation* BT.500-7, 1990) e VQEG, *Video Quality Experts Group*, (cf. VQEG, 2014), estão estudando formas de aplicar QoE em diferentes cenários fixos e móveis; o que é, porém, considerado ainda um desafio.

Aliado à evolução das redes móveis, outro tema constantemente abordado é o conceito de *Green Networks* (Redes Verdes), que possui foco no esforço para economia de energia e redução de CO₂ (Dióxido de Carbono). Nesse contexto, em dezembro de 2008, a CE (Comissão Europeia) decidiu reduzir a emissão de CO₂ em 20% e melhorar a eficiência energética em 20% até 2020 (UNIÃO EUROPEIA, 2013).

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 está crescendo explosivamente. Além disso, a economia de energia em sistemas de comunicações móveis está relacionada à redução do consumo de energia nas Estações Base (*Base Stations - BSs*) e Estações Móveis (*Mobile Stations - 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 objetivos mais importantes do setor de TIC para os próximos anos.

Em vista disso, o aumento exponencial do tráfego de voz e dados impulsionado por uma nova geração de dispositivos sem fio deverá sobrecarregar a capacidade da rede celular em um futuro próximo. Este crescimento sem precedentes fez com que as tecnologias de informação e comunicação sejam uns dos principais contribuintes para as emissões de CO₂, pois a implantação densa de estações rádio base pode aumentar o consumo de energia que por sua vez irá causar o aumento de CO₂ e impor mais desafios e custos operacionais para as operadoras.

Assim sendo, a eficiência energética é considerada como um fator muito importante para a concepção de futuros sistemas de comunicação no ambiente de redes verdes, porque a redução do consumo de energia de estações base e estações móveis podem contribuir diretamente para reduzir a emissão de CO₂.

Com isso, a economia de energia em sistemas de comunicações móveis está intimamente relacionada à redução do consumo de energia de transmissão de Estações Base e Estações Móveis (KIM & CHO, 2009). Neste contexto, a tecnologia *femtocell* pode ser apontada como uma solução mitigadora. Entretanto, as *femtocells* têm características que podem limitar a QoS e reduzir a eficiência da rede, por serem autoconfiguráveis, uma vez que usam padrões de atribuição limitados, tais como o nível de potência do sinal. Diversas tecnologias atualmente fornecem suporte à Qualidade de Serviço, porém não há garantias de que, em um ambiente heterogêneo, seja possível manter a qualidade dos serviços à medida que o usuário troca de rede devido à sua mobilidade (ALMEIDA et al., 2013). E também não há garantias de suporte adequado à Qualidade de Experiência para aplicações multimídia (NKANSAH-GYEKYE & AGBINYA, 2007).

Abordando esse aspecto, foi modelado em Cardoso et al. (2012) um processo markoviano de decisão, o qual é formulado para obter a política, que pode ser aplicada sobre o dispositivo móvel. Diante do exposto, este trabalho associa duas abordagens importantes que podem potencializar-se mutuamente: uma política de otimização baseada em processo markoviano de decisão, aliada a um modelo de simulação, elaborado a partir de um simulador de redes NS-2 (*Network Simulator 2*) com o módulo MIH (*Media Independent Handover*) e o módulo de bateria de Rakhmatov-Vrudhula.

1.1 Objetivo Geral

O escopo dessa dissertação visa a apresentar a política markoviana no simulador para ajudar na tomada de decisão do dispositivo móvel durante o *handover* e, assim, propor um consumo ideal de energia para o usuário nas redes *macrocell/femtocell* para garantir

melhores resultados das métricas de QoS e QoE utilizadas neste trabalho. Assim a ideia é juntar duas técnicas de avaliação de desempenho: a modelagem analítica (modelo markoviano de política apresentado no trabalho de Cardoso et al. (2012)) e a modelagem de simulação (inserção da política no simulador para que se tenha uma ideia do desempenho da mesma no sistema) onde é concentrada essa dissertação.

1.2 Objetivo Específico

O intuito é programar o algoritmo da política gerada pelo modelo markoviano de Cardoso et al. (2012) e inseri-lo num simulador discreto, tendo como propósitos: criar cenários para simulação utilizando as redes *macrocell* e *femtocell*, utilizar o módulo MIH para prover o *handover* entre as redes heterogenias, aplicar o módulo de bateria Rakhmatov-Vrudhula para estimar o consumo de baterias dos nós móveis, avaliar o desempenho das redes e da aplicação multimídia através das principais métricas de QoS e QoE, e comparar os resultados dos cenários testados no simulador.

1.3 Organização da Dissertação

Este documento está dividido da seguinte maneira:

- Capítulo 2: Introduz os conceitos, as tecnologias e apresenta o estado da arte, o que é necessário para a compreender o estudo realizado. O capítulo inicia com um breve histórico sobre a evolução das redes móveis, em que se destacam as características e os principais conceitos de *femtocells* e finaliza com uma breve definição dos modelos de baterias para os dispositivos móveis em um simulador.
- Capítulo 3: Apresenta uma breve descrição do estado da arte envolvida nesta dissertação. São contextualizados neste capítulo as definições e os conceitos do MIH, QoS e QoE.
- Capítulo 4: Apresenta as técnicas de modelagem para avaliar desempenho, e explica, de forma detalhada, as etapas e as principais técnicas de especificação.
- Capítulo 5: Apresenta os trabalhos relacionados ao estudo de caso desta dissertação e mostra lacunas na literatura, as quais serviram de base para o desenvolvimento da proposta.
- Capítulo 6: Detalha a metodologia aplicada. Apresenta os principais métodos utilizados para a escrita desta dissertação.
- Capítulo 7: Avalia os resultados dos experimentos da simulação.

- Capítulo 8: Demonstra as considerações finais sobre os temas abordados no trabalho; apontando as dificuldades encontradas e os possíveis desdobramentos em estudos futuros.

CAPÍTULO 2 – TECNOLOGIAS DE REDES SEM FIO

2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, faz-se uma descrição das tecnologias que serão estudadas ao longo do trabalho. Inicia-se com uma breve descrição sobre o crescimento da comunicação de dados. Depois, apresentam-se os elementos que compõe uma rede celular e a evolução deles. Em seguida, apresenta-se a arquitetura e os principais conceitos de *femtocells*. Por fim, são abordados os modelos de baterias dos dispositivos móveis para estudo em um simulador.

2.2 Redes de Telefonia Móveis

Segundo Costa (2013), boa parte do território nacional possui cobertura de sinal de telefonia móvel, seja ele de segunda, terceira ou quarta geração. No Brasil, dados divulgados pela ANATEL indicam que o país registrou, em 2013, 271,10 milhões de linhas ativas na telefonia móvel e foram registradas 9,92 milhão de novas habilitações. 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 terminais 4G (ANATEL, 2014a). Estes dados tendem a crescer nos próximos anos, principalmente devido aos grandes eventos esportivos que foram sediados no Brasil nesse ano de 2014 e serão sediados também em 2016 (COPA TRANSPARENTE, 2013). Tais números mostram a capacidade dessa tecnologia em alcance e capilaridade.

Na telefonia móvel, as Estações Rádio Base, doravante ERBs, são as responsáveis por prover o serviço de telefonia celular: além de transmissão de voz, o serviço mais comum em telefonia móvel, aplicações em automação comercial, indústria e também gerenciamento de distribuição, seja ele de energia elétrica, gás e água (CAI et al., 2010).

Com o avanço dos sistemas de comunicação e de telefonia móvel, uma das formas de viabilizar o aumento do número de usuários é garantir uma melhor qualidade no serviço prestado pelas operadoras. Para isso, determinadas áreas geográficas são divididas em “células” e são agrupadas em *clusters* (PAREIT et al., 2012).

Cada célula é servida pelo seu próprio conjunto de radiotransmissores e rádio receptores. Assim, reduz-se a potência necessária nas interfaces de Rádio Frequência (RF). Em locais com grande densidade de usuários se faz necessário projetar células menores e transmissores de menor potência, para que os canais possam ser reutilizados, aumentando, portanto, a capacidade de usuários do sistema (CAI et al., 2010).

No que diz respeito à arquitetura e infraestrutura, a rede celular é composta por diversos elementos, que são interligados entre si através de um canal de comunicação. Cada elemento dessa arquitetura tem uma função distinta e fundamental dentro do cenário, como, por exemplo, enviar o sinal de rádio frequência até uma estação móvel (celular) ou até mesmo buscar em uma base de dados se o usuário que solicitou a chamada e se tem permissão ou não de realizá-la (PAREIT et al., 2012).

Em especial, as primeiras gerações de tecnologia móvel transmitiam somente a voz, sendo as principais a TACS (*Total Access Communication 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 for Mobile*), na Europa. O CDMA utilizava a tecnologia de espalhamento espectral e multiplexação por divisão de código; foi criada inicialmente para voz e permitia a transmissão de dados a 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, que é uma evolução da rede GSM. Essa tecnologia utiliza recursos da rede GSM com o acréscimo de alguns equipamentos em sua infraestrutura para suportar os novos serviços de dados e, posteriormente, testar a implantação de novas tecnologias como a 3G. A rede GPRS possui a seguinte arquitetura, segundo a Figura 1:

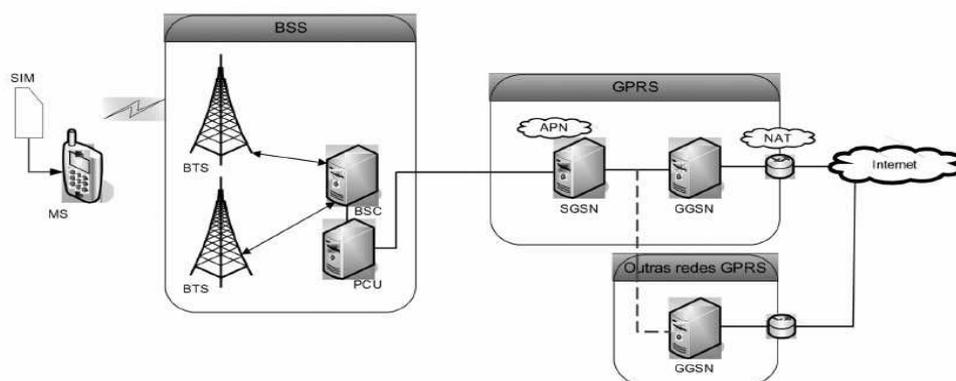


Figura 1. Arquitetura rede GPRS (PAREIT et al., 2012).

As principais modificações na rede GSM para o funcionamento da GPRS são descritas abaixo (COSTA, 2013):

- PCU (*Pocket Control Unit*): responsável pelas interfaces lógicas e físicas para o tráfego de dados.
- SGSN (*Serving GPRS Support Node*): responsável em entregar os pacotes de dados para estações móveis dentro de sua área de serviço.
- GGSN (*Gateway GPRS Support Node*): atua como uma interface com a rede externa de pacotes (Internet). Ele converte os pacotes GPRS vindos do SGSN para o formato PDP (*Packet Data Protocol*) adequado e os envia para a rede externa correspondente.

A tecnologia GPRS foi seguida pelo EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*) em 2002 com taxas teóricas de 384 Kbps, sendo 56 Kbps um valor mais real. Ambas as tecnologias ainda trabalhavam em canais desenvolvidos para transmissão de voz. A partir disso, ficou claro que era necessário um novo padrão que pudesse prover canais apropriados para transmissão de dados.

Então, foi criada a 3G para atender a essa demanda. Nessa nova geração, o GSM mudou sua tecnologia para CDMA utilizando a tecnologia de transmissão WCDMA e utiliza o padrão UMTS (KOROWAJCZUK, 2011). Inicialmente, o UMTS foi definido para voz, porém tinha potencial para adicionar canais otimizados para dados. Diante disso surgiu o HSDPA para tráfego de *downlink* e o HSUPA para tráfego de *uplink*. Ambas as tecnologias foram consolidadas no HSPA e HSPA+ (*Release 7*).

Em dezembro de 2008, o 3GPP, anunciou o que seria a 4ª Geração de redes móveis chamada LTE que utilizaria a tecnologia 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 todas 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- <i>Advanced</i>
Vazão	14,4	114	384	2 Mbps	7,2/14,4	21/42	100	1 Gbps

teórica (downlink)	kbps	kbps	kbps		Mbps	Mbps	Mbps	
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

Destaca-se que, apesar da evolução das redes de telefonia móveis, ainda há deficiência em ambientes fechados; pois, em grande parte dos casos, a cobertura é deficiente, devido à maioria das conexões de dados serem realizadas em ambientes *indoor*, onde o sinal propagado pelas redes *macrocell* não consegue chegar aos níveis exigidos para uma prestação de serviços com qualidade (COSTA, 2013).

Estudos indicam que, na Europa, entre 30% e 40% de todo o tráfego efetuado nas redes móveis ocorrem quando os usuários se encontram no interior de casas e edifícios. Em sua maioria, estes serviços são suportados por macrocélulas, normalmente instaladas em ambientes *outdoor*, no topo de edifícios ou mastros, para garantir uma cobertura de rede mais abrangente (COSTA, 2013).

Nesse sentido, as empresas de telefonia têm investido em alternativas tecnológicas focadas principalmente na melhoria do sinal para ambientes *indoor*. Diante do exposto, a tecnologia *femtocell* pode ser uma solução, pois ela apresenta um forte potencial para melhorar a capacidade dos sistemas sem fio de próxima geração, uma vez que oferece melhores níveis de sinal em ambientes fechados. Essa tecnologia será detalhada na próxima seção.

2.3 Femtocell

O conceito *femtocell* é parte integrante dos esforços da indústria de telecomunicações para fornecer comunicação de alto rendimento, serviços de alta qualidade para a casa dos usuários. Em contraste com os tipos de células convencionais, que são bem planejadas pelas operadoras, as estações base *femtocell* devem ser instaladas pelos próprios clientes, semelhante a um ponto de acesso sem fio (LI et al., 2011).

De acordo com Chandrasekhar & Andrews (2008), as *femtocells* são pequenas estações base com a mesma funcionalidade que as *macrocells*; porém, elas possuem potência para atenderem somente um ambiente restrito (de 10 a 20 metros), baixo custo, suporte a uma pequena quantidade de usuários, que variam de 2 a 16 usuários, dependendo do ambiente (residencial ou empresarial). A ideia é que em cada ambiente haja instalada uma *femtocell* e que os receptores sem fio dentro do alcance a utilizem para comunicação no lugar da *macrocell*.

2.3.1 Padronização

O *Femto Forum* (FEMTO-FORUM, 2013) é uma organização sem fins lucrativos fundada em 2007 para promover a implantação *femtocells* em todo o mundo. O *Femto Forum* é composto por mais de 135 membros, incluindo: operadoras de telefonia móvel, os principais fabricantes de equipamentos de infraestrutura, fornecedores de *femtocells* e fornecedores de componentes, subsistemas, silício e software necessário para criação *femtocells*. A missão do *Femto Forum* é promover o desenvolvimento e a adoção de pequenas células para o fornecimento de cobertura de alta qualidade e serviços nos mercados de acesso residencial e empresarial.

Funcionando no mesmo espectro de frequências dependendo da configuração das restantes células de rede móvel – *macrocell*, *microcell*, *picocell* –, (cf. Figura 2), as *femtocells* garantem compatibilidade com os terminais que os clientes já possuem (2G ou 3G), suportando todas as funcionalidades/serviços das restantes células. As potências de emissão utilizadas são muito inferiores às utilizadas nas células de rede *macrocell*, entre os 20 mW e os 100 mW, como pode ser visto abaixo, na relação de coberturas entre células.

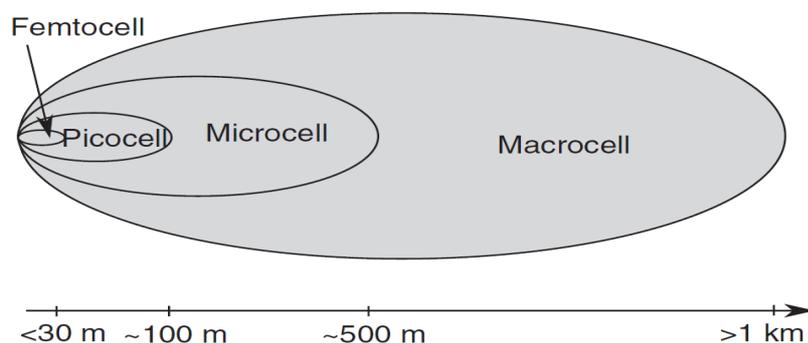


Figura 2. Relação entre coberturas de células de redes móveis (ZHANG & ROCHE, 2010)

Em abril de 2009, uma cooperação entre o 3GPP, *Femto Forum* e *Broadband Forum* (BROADBAND, 2013) publicou o primeiro padrão oficial da tecnologia *femtocell*. Isso

abriu caminho para as *femtocells* serem produzidas em grandes volumes. No novo padrão, que faz parte do 3GPP Release 8 (LTE), o ponto de acesso *femtocell* é chamada *Home NodeB* (HNB) e no LTE a *femtocell* é chamada de HeNB.

A *femtocell* conecta ao EPC através das interfaces S1-MME e S1-U. É possível que um *gateway* HeNB seja empregue para permitir que a interface entre as HeNBs S1 e EPC dimensione e suporte um grande número de HeNBs. O *gateway* HeNB (HeNB GW) apareceria uma HeNB como uma MME, enquanto para a MME a porta de entrada apareceria como um HeNB. Se um HeNB liga ao EPC diretamente ou não, a interface S1 permanece o mesmo. Mostra-se um E-UTRAN com HeNB na Figura 3 (TAHA et al., 2012):

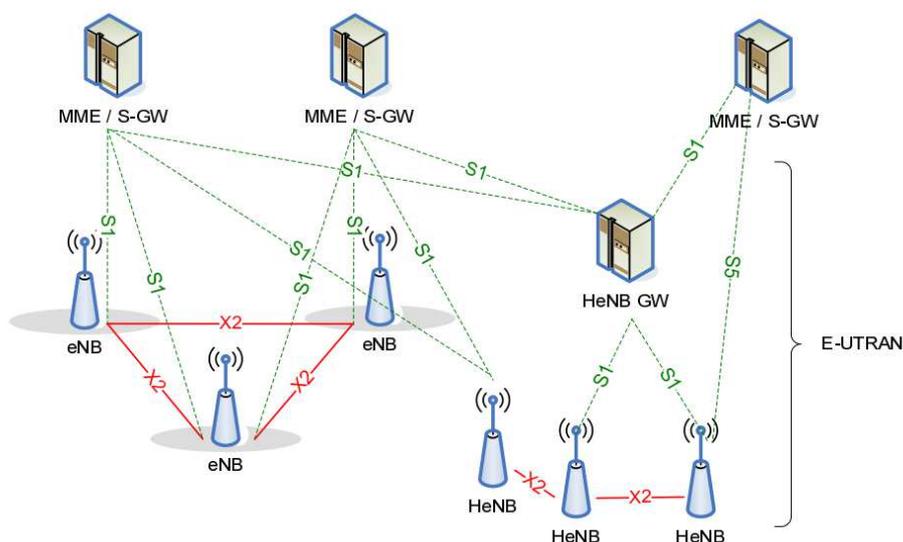


Figura 3. Arquitetura E-UTRAN com implantação de HeNB-GW (3GPP, 2010)

No Brasil, a Anatel publicou no mês de novembro de 2013 o regulamento que disciplina o uso das *femtocells*. Esses equipamentos poderão ser utilizados pelas empresas com outorgas de SCM (Serviço de Comunicação Multimídia), SMP (Serviço Móvel Pessoal) e SME (Serviço Móvel Especializado) com potência não superior a 1 w. O regulamento determina que os aparelhos sejam gerenciáveis pela operadora e a sua cobertura não será computada para o cumprimento de metas de cobertura. Considerado um equipamento de radiação restrita como os pontos de acesso Wi-Fi, as *femtocells* estão isentas do recolhimento das taxas do Fistel (ANATEL, 2014b).

2.3.2 Principais Características

Um fator a ser levado em consideração é que o processo de instalação dessas *femtocells* seria a cargo do usuário, ou seja, *plug and play* e sem muita consideração quanto ao planejamento, contando apenas com as habilidades de autoconfiguração embutidas para

minimizar o impacto sobre o *macrocell* por meio de parâmetros de autoprovisionamento. Andrews et al. (2012) fazem uma abordagem geral sobre a história das *femtocells*, descrevendo seus aspectos fundamentais, e apresentam uma previsão para os próximos anos: acreditam que haverá um grande crescimento da tecnologia de pequenas células.

Na *macrocell* espera-se a diminuição do tráfego, melhorando o serviço para os usuários e reduzindo os custos para a operadora. A partir da *femtocell*, a comunicação segue pela rede de dados (Internet) até chegar ao *backbone* ou central do provedor de serviços. Isso permite as operadoras disponibilizar novos planos e serviços com preços diferenciados no ambiente de cobertura da *femtocell*, usando a banda larga que já é do cliente; permitindo, ainda, às operadoras aumentar a capacidade da rede com menor investimento, pois elimina os custos relacionados à implantação de *macrocells*, utilizando a infraestrutura pronta do cliente (SILVA, 2014). Um esquema básico da rede *femtocell* pode ser visto na Figura 4:

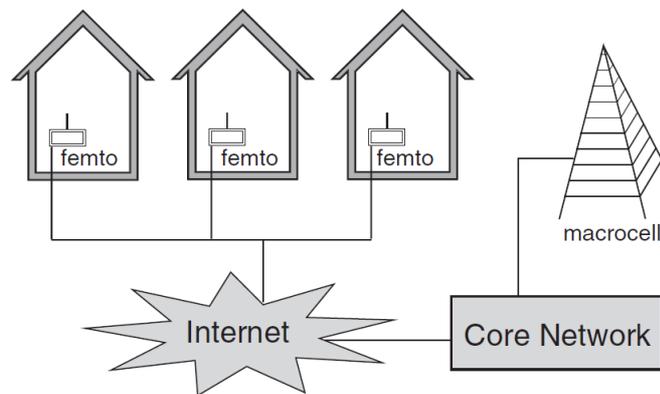


Figura 4. Esquema básico da rede *femtocell*, adaptado de (ZHANG & ROCHE, 2010)

O conceito de *femtocell* podem ser aplicados a qualquer tecnologia de comunicação sem fio, como WiMAX, por exemplo, não se restringindo somente às redes celulares (UMTS ou LTE). Sendo assim, as *femtocells* podem trabalhar em frequências livres (WiMAX) ou licenciadas (LTE).

Além das características já mencionadas, as *femtocells* também precisam interagir com as redes celulares tradicionais para a realização de tarefas como a *handovers*, gerenciamento de interferência e autenticação (ANDREWS et al., 2012).

2.3.3 Arquitetura da Rede *Femtocell*

As *femtocells* estão previstas para serem implantadas em larga escala para usuários domésticos e corporativos. Este novo modelo de implantação não planejada requer uma arquitetura de rede que atenda aos seguintes requisitos:

1. Escalável para um grande número de *femtocells* com o mínimo ou nenhum impacto na infraestrutura existente.
2. Conectividade segura e confiável a partir de *femtocell* à rede básica do operador através da Internet.
3. Remotamente configurável.

A arquitetura da rede *femtocell* é composta por três elementos principais: A *femtocell* (HNB), que incorpora as funcionalidades da *NodeB* e RNC (*Rádio Network Controller*) da UTRAN (UMTS), já na E-UTRAN (LTE) a HNB, chamada de HeNB, agrega as funções da *eNodeB*. Mais detalhes sobre esta arquitetura podem ser encontrados em 3GPP (2010). A HNB se conecta aos usuários (UEs) através da interface *Uu* e ao HNB-GW através da nova interface *Iu-h*.

O *femto-gateway* (HNB-GW) concentra as conexões das HNBs e as repassa para o núcleo da rede (*Core Network*), trata todo tráfego de sinalização e autentica cada *femtocell*. O HMS (*HNB Management System*) é usado para prover os dados de configuração das HNB de forma remota usando a família de padrões de TR-069, dentre essas configurações destacam-se as atualizações de softwares, parâmetros da HNB e diagnósticos de problemas. O SeGW (*Security Gateway*) usa IPsec (FEMTO-FORUM, 2013) para fornecer uma ligação segura entre o HNB e o HNB-GW (através da *Iu-h*) e entre o HNB e o HMS. O SeGW também é responsável pela autenticação da HNB (CHEN et al., 2014).

Em Claussen et al. (2008) são descritas propostas de como pode ser realizado o processo de configuração da *femtocell* e registro na rede da *macrocell*. Também são descritos métodos para autenticação e autoconfiguração dos parâmetros iniciais (frequências, potências, etc).

2.3.4 Alocação de Canais de Frequência

De acordo com Gago (2013), existem dois tipos de alocações de frequências em redes *femtocell-macrocell*: alocação com canais dedicados e alocação co-canal. No modo de canal dedicado, diferentes canais de frequência são atribuídos às *femtocell* e *macrocell*; portanto, não há interferência entre as mesmas, porém este método pode desperdiçar recursos, já que nem sempre existirá uma *femtocell* utilizando o canal reservado. Por outro lado, o método de co-canal atribui o mesmo canal de frequência para o *femtocell* e para a macrocélula.

handovers macro-femto, femto-macro e femto-femto. Devido à cobertura limitada e à alta densidade de *femtocells*, é possível que os usuários realizem muitos *handovers*, sendo alguns deles desnecessários. Com isso, surge a necessidade de melhorias no processo de *handover*. Diversos trabalhos têm sido publicados na academia buscando soluções para esses desafios. Dentre eles: Chueh et al., 2011; Chowdhury et al., 2011; Zhuang et al., 2012.

2.3.7 Backhaul

Na maioria das tecnologias existentes normalmente é necessário algum tipo de QoS. Para as redes *femtocell* não será diferente: a exigência e a garantia de entrega de seus pacotes devem ser mantidos e a priorização de dados, como voz, deve ocorrer para manter qualidade na conversação do usuário. Porém, *femtocells* utilizam a infraestrutura da Internet, como um *backhaul* para se conectar a rede da operadora (*femto-gateway*). Este *backhaul* apresenta as seguintes questões: pouca segurança, QoS deficiente e largura de banda limitada (CHEN et al., 2010).

- **Segurança:** Qualquer comunicação entre a *femtocell* e o *femto-gateway* devem ter garantia de confidencialidade e integridade dos dados. Protocolos de segurança como IPSec podem ser utilizados para esta finalidade. Além disso, como a *femtocell* é implantada pelo usuário final, deve-se proteger o *femto-gateway* contra uma *femtocell* falsificada ou alterada. Para isso é necessário realizar a autenticação mútua entre a *femtocell* e o *Security Gateway* (que pode estar dentro ou fora do *femto-gateway*) usando as credenciais do dispositivo que são armazenados de forma segura dentro da *femtocell*.
- **QoS:** Na ausência de um *backhaul* dedicado com QoS, a comunicação entre o *femtocell* e o *femto-gateway* pode ser prejudicada pela perda de pacotes, atraso e *jitter* que podem variar durante o uso da *femtocell*. Esses fatores podem afetar as aplicações de tempo real, como voz e vídeo. Para tratar dessas questões, tanto a *femtocell* quanto o *femto-gateway* podem classificar pacotes sensíveis a atraso, utilizando o DSCP (*Differentiated Services Code Point*) nos cabeçalhos IP. Com isso, os roteadores intermediários podem priorizar esses pacotes adequadamente para melhorar a QoS. Para proteção adicional, a qualidade da aplicação pode ser monitorada e o usuário redirecionado para uma *macrocell* se a qualidade da conexão cair abaixo de um limiar.

- **Largura de banda limitada:** Normalmente, os provedores de Internet (ISPs) fornecem conexões assimétricas para usuários de banda larga, com mais largura de banda disponível no *downlink* do que no *uplink*. Assim, dependendo da aplicação, o número de usuários da *femtocell* fica limitado pelo *uplink*. Para reduzir a sobrecarga no *uplink*, técnicas como compressão do cabeçalho dos pacotes ou controle de admissão e escalonamento podem ser utilizadas como forma a minimizar o problema (HARIYANTO et al., 2011).

2.3.8 Interferência

Outro fator que tem sido abordado em vários trabalhos (CHANDRASEKHAR & ANDREWS, 2008; RANGAN & MANDAN, 2012; ZAHIR et al., 2013; MAQBOOL et al., 2011) é a interferência em redes *femtocell*. Existem três fontes de interferências: a) *macrocell* para *femtocell*, b) *femtocell* para *femtocell*, c) *femtocell* para a *macrocell*. O tipo (a) é a principal fonte de interferência, os tipos (b) e (c) de interferência são relativamente baixos devido à baixa potência de transmissão e ao efeito de isolamento gerado pelo alto nível de obstrução nos ambientes com *femtocell* (wall loss). A Figura 6 mostra os tipos de interferência:

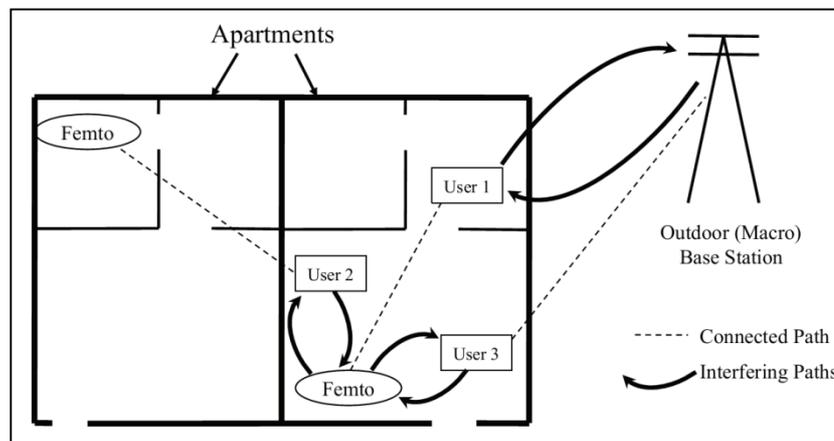


Figura 6. Tipos de interferência (FEMTO-FORUM, 2014).

Diversos trabalhos com diferentes soluções para reduzir a interferência em redes *femtocell* tem sido publicados. Em Zahir et al. (2013) foi apresentado um estudo sobre a gestão de interferência em redes *femtocells*. Os autores resumem os principais desafios enfrentados em ambientes com alta densidade de *femtocells* e mostram as soluções propostas ao longo dos anos. *Femtocells* são normalmente implantados com um planejamento mínimo de RF. Isso requer que as *femtocells* sejam capazes de se auto-organizar, buscando otimizar

os recursos de rádio (frequência, potência, etc.) Outros estudos sobre gestão de interferência podem ser vistos em Rangan & Mandan (2012).

2.4 Modelos de Bateria

Os modelos matemáticos de bateria representam características reais de uma bateria com a finalidade de prever seu desempenho. São úteis para projetos de sistemas alimentados por baterias, pois permitem a análise do seu comportamento de descarga (SAUSEN, 2008).

Existem vários tipos de modelos com diferentes características e complexidades. De acordo com Jongerden & Haverkort (2008) e Lahiri et al. (2002), há: modelos analíticos, modelos baseados em circuitos elétricos, modelos estocásticos e modelos eletroquímicos. Entre eles, destacam-se os modelos analíticos, por serem simples e flexíveis na implementação e por serem facilmente configurados para diversos tipos de baterias.

Uma bateria geralmente consiste de uma matriz de uma ou mais células eletroquímicas. Cada célula é formada por dois eletrodos (condutor metálico por onde a corrente entra e sai de um sistema): um ânodo de polaridade negativa e um cátodo de polaridade positiva, separados por um eletrólito (condutor de eletricidade). As reações eletroquímicas que ocorrem na bateria dão origem às espécies eletroativas ou elétrons, que são liberados pelo ânodo para fornecerem corrente elétrica a um circuito externo, o que é denominado como fase de descarga da bateria (RAKHMATOV & VRUDHULA, 2001).

Conforme observado, em Jayashree (2004), o comportamento de uma bateria é representado por dois principais efeitos químicos, que devem ser considerados para determinar as propriedades de descarga e a capacidade da bateria (quantidade de materiais ativos presentes na bateria), de modo que sua capacidade real nunca poderá exceder sua capacidade teórica (quantidade máxima de energia que pode ser extraída da bateria). Os efeitos químicos estão a seguir:

- **Efeito de taxa de capacidade:** Depende da condição de que, quanto maior a corrente de descarga, menor será a capacidade disponível da bateria, geralmente medida em mA-h ou mA-ms.
- **Efeito de recuperação da capacidade (ou de relaxação):** A bateria recupera parte de sua capacidade quando se encontra em períodos ociosos ou relaxados, isto é, quando a corrente fornecida pela bateria é reduzida significativamente (LAHIRI et al., 2002). Essa recuperação possibilita o aumento da vida útil da bateria.

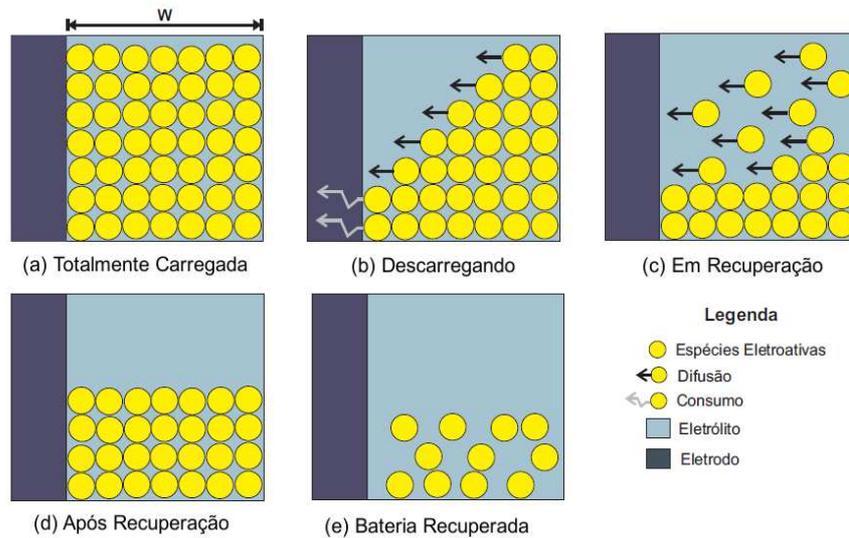


Figura 7. Estado de operação da bateria (SAUSEN, 2008).

Muitos modelos analíticos de baterias conseguem representar o efeito de taxa de capacidade e o efeito de recuperação. A Figura 7 ilustra esses efeitos em uma bateria. Ela apresenta os diferentes estados de operação de uma bateria de forma simplificada. Observa-se, na Figura 7(a), o estado da bateria totalmente carregada, com uma distribuição uniforme das espécies eletroativas em toda a região de comprimento w do eletrólito. O processo de descarga, representado na Figura 7(b), ocorre devido ao fluxo externo de elétrons entre os eletrodos, causando redução das espécies eletroativas da bateria. Quando a corrente é reduzida significativamente, ocorre um processo de difusão, de forma a reequilibrar a concentração das espécies na bateria [Figura 7(c)]. Tal processo explica a recuperação da capacidade da bateria (RAKHMATOV & VRUDHULA, 2003). A Figura 7(d) mostra o estado da bateria após a difusão, com sua capacidade já recuperada. Quando a concentração das espécies atinge certo limite, a bateria para de fornecer carga ao sistema, ficando indisponível [Figura 7(e)].

2.4.1 Modelo Linear

O modelo analítico mais simples é o modelo linear, em que a bateria é descarregada de forma linear, e nenhum efeito (taxa de capacidade e relaxação) é representado por ele. A Equação 1 permite calcular a capacidade restante (C) de uma bateria, sempre que a corrente de descarga, I , mudar, sendo C' a capacidade no início da operação e td , o tempo de duração da operação (SAUSEN, 2008; SPOHN et al., 2008).

$$C = C' - I.td$$

A maioria dos simuladores de rede utiliza o modelo linear de descarga de bateria. Esse modelo pode induzir a interpretações equivocadas na análise de protocolos, pois o cálculo de forma errada da capacidade disponível da bateria pode levar a uma falsa estimativa do consumo de energia, o que influencia diretamente no tempo de vida dos dispositivos de uma rede.

2.4.2 Modelo Rakhmatov – Vrudhula

Em Rakhmatov & Vrudhula (2001) é proposto um modelo de bateria analítico que representa os efeitos de taxa de capacidade e de relaxação, presentes em diferentes tipos de baterias (alcalinas e íons de lítio). Estes efeitos consideram que, quanto maior a corrente de descarga, menor a capacidade disponível na bateria, e que esta pode recuperar sua capacidade quando estiver em períodos ociosos. A recuperação possibilita o aumento da vida útil da bateria e, conseqüentemente, o tempo de vida da rede. Este modelo de bateria considera diferentes taxas de capacidade e de recuperação (em modo ocioso é possível aumentar o tempo de vida útil da bateria) para diferentes tipos de bateria. O consumo de energia de bateria no modelo não linear é representado pela seguinte fórmula sugerida pelos autores supracitados:

$$\alpha = \sum_{k=1}^n 2I_{k-1} A = (L, t_k, t_{k-1}, \beta) \quad (2)$$

Onde:

α : Bateria final

β : Comportamento não linear para carga e descarga

I_{k-1} = Corrente de descarga para o período k-1

A = Função para cálculo de comportamento não-linear

L = Tempo de vida da bateria

T_k = Tempo de duração para o período k

T_{k-1} = Tempo de duração para o período k – 1

Para esta dissertação foi escolhido o modelo de Rakhmatov – Vrudhula, que é tido como um modelo mais realista em relação às baterias utilizadas atualmente pois considera

os estados do dispositivo móvel, sendo que, para cada estado, há um valor de descarga elétrica diferente.

2.5 Considerações Finais

Neste capítulo, foi apresentado o levantamento do estado da arte das tecnologias envolvidas nesta pesquisa e foram contempladas as principais propriedades das redes celulares. Foram apresentados também os conceitos que norteiam as *femtocells*. E por fim foram contextualizados os modelos de baterias para dispositivos móveis

CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo serão apresentados os paradigmas das áreas envolvidas nesta dissertação. Inicialmente são abordados alguns conceitos do MIH. Em seguida, são apresentados as definições de QoS e por fim são demonstrados os conceitos de QoE.

3.2 *Media Independent Handover* (MIH)

O *Media Independent Handover* (MIH) viabiliza o *handover* vertical, isto é, atua entre tecnologias distintas, através 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 (Figura 8). Abstrai, assim, a tecnologia usada para as camadas superiores, ou seja, não importa qual tecnologia esteja sendo acessadas no momento, as funções disponíveis continuam as mesmas para as camadas superiores.

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

- 1) Facilitar a tomada de decisão do mecanismo de controle de mobilidade através 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.

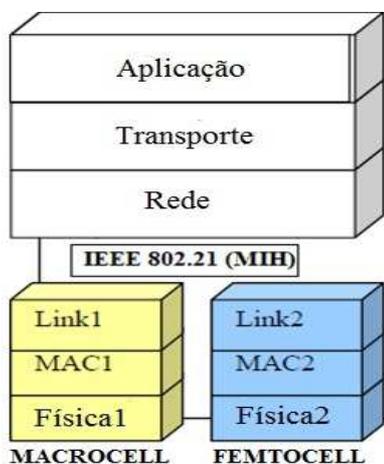


Figura 8. Arquitetura do módulo MIH

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 somente com base na intensidade do sinal RSS (*Received Signal Strength*) de um AP/BS, sendo insuficiente para assegurar QoS das aplicações (BOULHOSA et al., 2011). O módulo MIH utiliza a classe *handover* que possui três métodos importantes que são:

- *Link Up*: método que conecta MS (*Mobile Station* - Estação Móvel) em uma rede;
- *Link Down*: método que desconecta MS de uma rede;
- *Link detected*: método responsável de detectar um novo sinal de rede.

Através desses três métodos, a classe *handover* recebe informações de uma determinada rede para tomar a decisão de conectar em uma nova rede.

3.3 Qualidade de Serviço (QoS)

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 necessitavam de grande largura de banda e eram sensíveis a problemas de atrasos. Diversas classes de serviços com necessidades de recursos e diferentes prioridades passaram a ser demandadas gerando a necessidade de melhoramentos nos serviços oferecidos. Desta necessidade de melhoria dos serviços oferecidos surgiu a ideia do paradigma conhecido como QoS.

O conceito de Qualidade de Serviço abrange a garantia de níveis aceitáveis de serviços em diversas camadas no âmbito de rede. A recomendação E.800 da ITU-T define Qualidade de Serviço 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, 2014).

As métricas de QoS são usadas para caracterizar e descrever o comportamento da rede no que diz respeito à utilização e performance, 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 2 mostra as principais métricas de qualidade de serviço. As métricas de QoS utilizada na dissertação foram: atraso, jitter e perda de pacotes.

Tabela 2. Principais Métricas de QoS

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.
Throughput / Vazão - taxa de bits por segundo	Taxa de informação que chega e que é entregue por um nodo da rede por unidade de tempo.
Taxa de Perdas - %	Pacotes perdidos em relação ao total de pacotes enviados.

(PROJETO DE REDES, 2014)

3.4 Qualidade de Experiência - QoE

Os humanos são criaturas 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 humana. Portanto, uma determinada imagem pode ser agradável para alguns e desagradável para outros (WINKLER, 2005).

O SVH tem servido de base para os novos critérios de avaliação das novas arquiteturas de redes. O sucesso das redes da próxima geração permitiu a crescente demanda das aplicações multimídias na Internet (IPTV, *streaming* de vídeo, aplicações de áudio e vídeo). Diante disso, surgiu a necessidade de avaliar o impacto dessas aplicações perante o 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 Qualidade de Experiência 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 tais como: vazão, *jitter* e atraso, 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. Assim, não é possível afirmar se a qualidade do vídeo recebido

por esse usuário é realmente boa; pois, em se tratando de avaliações de aplicações multimídias, a sensibilidade humana é primordial.

Os resultados obtidos através dos estudos baseados em métrica 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. Consequentemente, melhoram os serviços das aplicações multimídia. Essa tem sido uma forte tendência e dois grupos de pesquisa vêm se destacando, segundo ITU (2012): *International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector* (ITU-T) e *Video Quality Experts Group* (VQEG).

3.4.1 Avaliação Subjetiva

As métricas subjetivas de QoE avaliam a qualidade das aplicações multimídias 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. As métricas subjetivas dependem exclusivamente da opinião/avaliação do usuário final, opinião que é importantíssima, pois, por meio dela, objetiva-se melhorar os serviços para os clientes finais. A métrica subjetiva mais popular é o MOS (*Mean Option Score*), cuja escala varia de 1 a 5 (Tabela 3). Nela, a atribuição do valor 5 indica excelente qualidade da aplicação, enquanto o valor 1 indica péssima qualidade da aplicação. A Tabela 3 mostra a escala de valores de MOS com a sua respectiva qualificação (ITU-R, 1996).

Tabela 3. Escala de Qualidade MOS

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

3.4.2. 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)*. Todas essas métricas citadas para avaliação de QoE foram utilizadas nesta dissertação.

3.4.3 *Peak Signal to Noise Ratio (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 um atributo real em relação ao qual esse mesmo atributo foi estimado. 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).

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \|Ys(i, j) - Yd(i, j)\|^2 \quad (3)$$

Onde:

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

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

$Yd(i,j)$ = 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. Considerando 8 bits por pixel, obtêm-se 255 (28 – 1) valores de luminosidade . O valor do PSNR é obtido através da seguinte fórmula, na escala logarítmica:

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{255}{\sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \|Ys(i, j) - Yd(i, j)\|^2}} \right) \quad (4)$$

O PSNR é a métrica mais popular, porém não a mais completa, pois indica apenas a diferença dos *frames* recebidos em relação aos *frames* originais, desconsiderando características importantes do SVH. O valor de PSNR é expresso em dB (decibel). Para que um vídeo seja considerado de boa qualidade deve ter um valor médio de PSNR no mínimo

de 30dB. Essa afirmação é baseada no mapeamento de valores de PSNR para MOS. Veja na Tabela 4 o mapeamento PSNR para MOS (JAIN, 2004).

Tabela 4. Mapeamento PSNR para MOS

PSNR (dB)	MOS
> 37	5 (Excelente)
31 – 37	4 (Bom)
25 – 31	3 (Regular)
20 – 25	2 (Pobre)
< 20	1 (Péssimo)

3.4.4 *Structural Similarity Index* (SSIM)

O SSIM, diferentemente do PSNR que apenas analisa a taxa de erro do vídeo recebido em relação ao vídeo original, avalia o vídeo recebido levando em consideração as características 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 e não em extrair taxa de erro (UEMURA et al., 2008).

Os valores extraídos do *frame* recebido pelo usuário e do *frame* original são armazenados em vetores separados: um vetor para luminosidade, outro vetor para estrutura e um vetor para 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 de SSIM é obtido através da seguinte fórmula (WANG, 2004):

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2cov_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (5)$$

Onde:

μ_x é média de x ;

μ_y é a média de y ;

σ_x^2 é a variância de x ;

σ_y^2 é a variância de y ;

cov_{xy} é a covariância de y ;

$c_1 = (k_1L)^2$, $c_2 = (k_2L)$ são duas constantes;

L 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 do 0, pior é a qualidade do vídeo; quanto mais próximo de 1, melhor é a qualidade do vídeo. No caso em que o valor é igual a 1, o vídeo recebido pelo usuário corresponde em 100% ao vídeo original (TAKAHASHI et al., 2008).

3.4.5 Video Quality Metric (VQM)

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

A métrica VQM, assim como as demais, baseia-se na comparação do vídeo recebido pelo usuário em relação ao vídeo original, comparando o brilho e o contraste. A primeira etapa consiste na “calibração”. Nessa etapa, o contraste e o brilho dos vídeos são comparados. A segunda etapa consiste na comparação do alinhamento espacial. Verifica-se a posição no eixo horizontal e vertical de ambos os vídeos. A terceira etapa consiste em analisar a quantidade de pixels perdidos em relação ao vídeo original. A quarta etapa refere-se ao 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 consiste em avaliar o atraso do vídeo recebido pelo usuário.

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

3.5 Considerações Finais

Neste capítulo, foi apresentado o levantamento do estado da arte envolvido nesta pesquisa, contemplando as definições e características do MIH e os conceitos das métricas de QoS e QoE.

CAPÍTULO 4 – AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS

4.1 Considerações Iniciais

Quando se pretende avaliar o desempenho de um determinado sistema, o primeiro passo desse processo consiste em identificar a técnica que mais se adequa ao sistema sob análise. Inicialmente, apresentam-se considerações importantes sobre avaliação de desempenho. Em seguida, aborda-se, de forma mais detalhada, o processo de modelagem e as técnicas de desempenho. Por fim, trata-se, de forma sucinta, do formalismo para sistemas no contexto da modelagem por simulação e modelagem analítica.

4.2 Avaliação de Desempenho

A análise ou avaliação de desempenho é um fator fundamental em qualquer estágio do ciclo de vida de um sistema. Durante a etapa de planejamento, pode ser usada para investigar o comportamento do sistema de forma a observar as relações existentes entre as variáveis ou verificar se ele corresponderá às exigências especificadas (BOLCH et al., 1998; HAREL, 1987). Após a implantação de um sistema, a análise de desempenho pode ser aplicada para encontrar possíveis gargalos e sugerir alternativas para a sua expansão (FRANCÊS, 2001).

De forma genérica, as técnicas de avaliação de desempenho podem ser divididas em dois grupos que, de certa forma, podem ser vistos como complementares. No primeiro grupo, encontram-se as técnicas que obtêm medidas para a avaliação a partir de experimentações no sistema real; no segundo, estão as técnicas que obtêm tais medidas a partir de abstrações criadas para representar o comportamento desse sistema. A representação das técnicas de avaliação de desempenho pode ser observada conforme a Figura 9.

Uma taxonomia para essas técnicas é proposta em Francês (2001). O autor sugere uma divisão em duas classes: as técnicas de aferição e as de modelagem, para o primeiro e segundo grupo respectivamente. Por essa divisão, pode-se observar que a escolha da técnica está diretamente relacionada ao estágio do ciclo de vida em que o sistema se encontra. Para os casos em que o sistema já existe e seu desempenho pode ser averiguado empiricamente, as técnicas de aferição são as mais recomendadas. Estão nessa classe, por exemplo, os *benchmarks*, os protótipos e a coleta de dados (através de monitores de *hardware* e/ou de *software*).

Em contrapartida, para os sistemas inexistentes, Francês (2001) sugere as técnicas de modelagem. No contexto de avaliação de desempenho, modelagem é um processo complexo e com um forte teor matemático, mas que de maneira simplista pode ser definida como a utilização de uma abstração que contemple em seu cerne as características essenciais de um sistema real, sendo que, através da solução desse modelo, pode-se ter uma aproximação de como o sistema se comportaria se o mesmo fosse efetivado (HAREL, 1987).

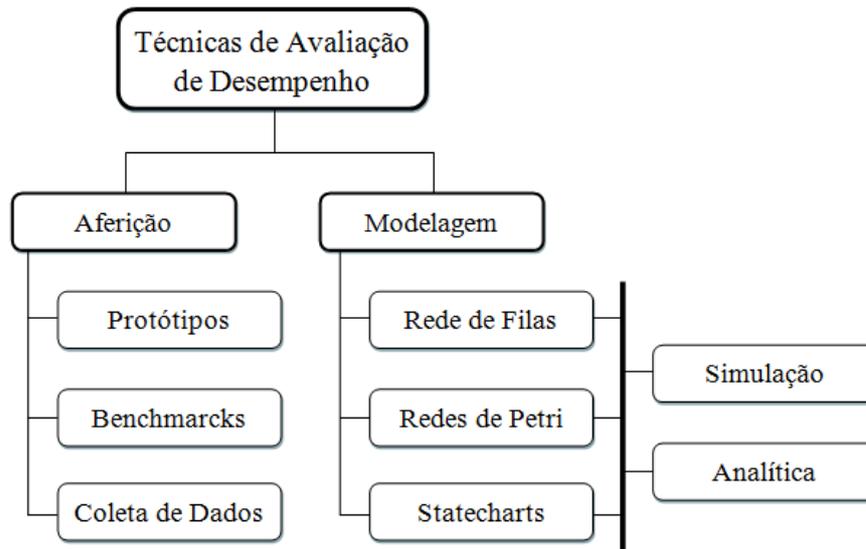


Figura 9. Técnicas de avaliação de desempenho (SANTANA et al., 1997)

4.3 Métricas

Métricas dizem respeito ao critério usado para qualificar o desempenho de um determinado sistema. São exemplos de métricas usualmente adotadas:

- **Utilização:** É o período de tempo em que o sistema permanece ocupado, atendendo a pedidos;
- **Vazão:** É definida como a taxa em que as requisições podem ser atendidas pelo sistema. Permite determinar a velocidade com que as requisições são atendidas e, portanto, como o servidor está tratando as diversas solicitações do serviço.
- **Tempo de resposta:** É definido como o intervalo entre a requisição do usuário e a resposta do sistema.
- **Taxa de Custo / Desempenho:** É uma métrica interessante para se comparar dois sistemas. O custo inclui *hardware*, *software*, instalação e manutenção em um número de anos. O desempenho é medido em termos da sua vazão, considerando uma dada restrição de tempo de resposta.

- **Confiabilidade:** É medida pela probabilidade de erros ou o intervalo de tempo entre os erros, também com frequência especificada com segundos livres de erros. Através deste indicativo, podem-se comparar serviços diferentes e indicar o maior tempo possível.
- **Disponibilidade:** É a fração de tempo em que o sistema se encontra disponível para atender as requisições do usuário. O tempo em que o sistema não está disponível é chamado de *downtime*, e o tempo em que está ativo é chamado de *uptime*.

4.4 Aferição

As técnicas de aferição são utilizadas quando se faz necessário coletar dados de um sistema já pronto (sistema real) e, posteriormente, para fazer os cálculos das métricas com esses dados. Um problema encontrado nessa técnica é que ela atua diretamente no sistema, disputando recursos e, via de regra, interferindo nos resultados a serem avaliados.

Tem alta exatidão somente se for realizada de forma correta, pois somente assim poderá determinar os resultados do modelo com precisão.

Podem-se destacar três técnicas de aferição: protótipo, *benchmark* e monitoração. A seguir será apresentada uma breve definição de cada uma das técnicas:

- **Protótipo:** É uma simplificação de um sistema original, mantendo o mesmo comportamento funcional e descartando as características irrelevantes (FRANCÊS, 2001).
- **Benchmark:** É um padrão de desempenho, normalmente um programa de computador, usado para testar o desempenho de um *software* ou um *hardware* (idem, 2001).
- **Monitoração:** É uma ferramenta cujo propósito é monitorar um sistema computacional. Por intermédio de tal técnica, pode-se observar o desempenho de um sistema de forma a coletar os dados e mostrar as estatísticas de desempenho, entre outros resultados (SILVA, 2014).

Em resumo, as técnicas de aferição são aplicadas quando um sistema já existe (parcialmente ou em sua totalidade) e as medidas de desempenho são obtidas a partir de experimentação do próprio sistema. Detalhes sobre cada uma das técnicas de aferição são omitidos por não fazerem parte do escopo deste trabalho. Contudo, mais referências sobre esse grupo de técnicas podem ser encontradas em Silva (2014) e Cortés (1999).

4.5 O Processo de Modelagem

O processo de avaliação de desempenho por meio de modelagem consiste de um conjunto de etapas intimamente inter-relacionadas. A Figura 10 apresenta as etapas de um processo de modelagem:

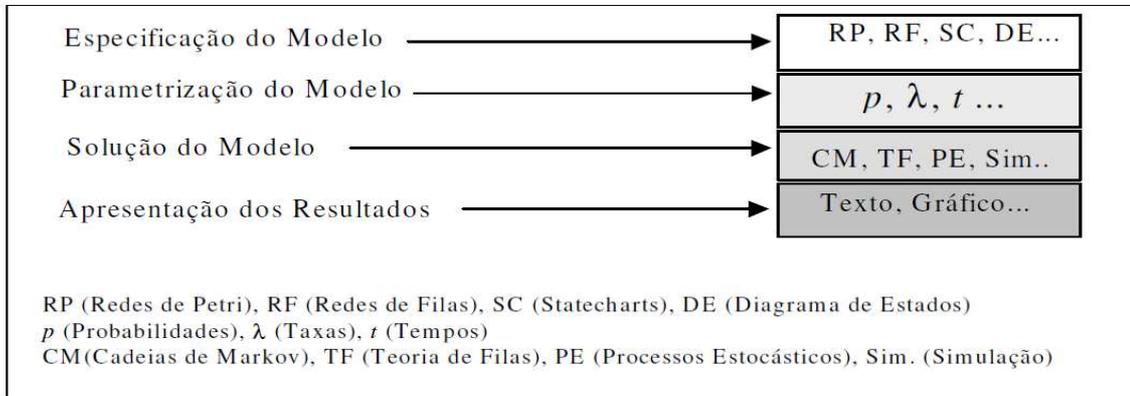


Figura 10. Etapas do processo de modelagem (FRANCÊS, 2001)

Na fase inicial desse processo, deve-se criar uma especificação coerente com o sistema real, na qual devem estar contidos os componentes do sistema relevantes à avaliação, além do relacionamento entre eles. De maneira idealizada, essa especificação deve ser capaz de representar o sistema de forma clara e livre de ambiguidades. Algumas das principais técnicas utilizadas para especificação são redes RP (Redes de Petri, cf. PETERSON, 1981), RF (Redes de Fila, cf. JAIN, 1991), SC (*Statecharts*, cf. HAREL, 1987) e DE (Diagramas de Estados e Transições, cf. LEWIS et al., 1997). Após a elaboração do modelo com uma das técnicas citadas, deve-se indicar os parâmetros do sistema, os quais serão passados como entrada para a fase de solução.

Comumente, esses parâmetros são probabilidades (p), taxa de ocorrência de eventos (λ) e tempo médio entre ocorrência de evento (t). Na fase seguinte (solução), as medidas de desempenho, que representam de forma quantitativa como o sistema se comporta em função dos parâmetros dados, são adquiridas por meio da aplicação de um método matemático, o qual pode ser automatizado ou não. Para a solução, pode-se utilizar um método analítico, por exemplo, CM (Cadeias de Markov, cf. BOLCH, 1998) e TF (teoria de filas, cf. JAIN, 1991), ou SIM (Simulação, cf. PIDD, 1998). Os resultados obtidos pela solução do modelo devem ser apresentados de forma conveniente (gráficos e/ou arquivos-textos) para que seja possível identificar os pontos de sobrecarga e/ou ociosidade do sistema.

4.6 Solução por Modelagens Analíticas

A modelagem analítica baseia-se no desenvolvimento de um modelo do sistema real, porém com um nível de abstração mais alto. Nesse caso, o modelo é puramente matemático. No modelo, o funcionamento do sistema real é reduzido a relações matemáticas.

Modelos analíticos podem ser determinísticos ou estocásticos. Em um modelo determinístico, todos os parâmetros do sistema são previamente determinados. Já em um modelo estocástico, o comportamento do sistema é analisado probabilisticamente, ou seja, os parâmetros do sistema são descritos por variáveis aleatórias, com distribuições de probabilidade convenientes.

No último caso, o sistema é descrito em termos de um conjunto de estados em que o mesmo pode se encontrar e de transições estocásticas entre esses estados. De acordo com Kleinrock (1975), uma transição estocástica é aquela cuja ocorrência é descrita por uma variável aleatória.

Desenvolver modelos analíticos normalmente exige maior abstração de aspectos da realidade, se comparado a modelos de simulação. Ainda, em alguns casos não se consegue obter uma resolução numérica, mas sim uma resolução analítica.

Eventualmente, a complexidade computacional do modelo pode tornar a resolução muito cara, ficando mais dispendiosa que uma resolução igualmente aceitável em simulação. Mesmo assim, métodos analíticos podem ser empregados com maior facilidade que outros métodos em vários casos. Uma vantagem desta técnica em relação às outras descritas é que não há a necessidade de se preocupar com um conjunto específico de amostras de funcionamento do sistema para a obtenção dos índices de desempenho.

4.7 Solução de Modelagem por 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 predições, 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 adequada de tempo (PIDD, 1992).

Os sistemas modelados podem alterar suas características com o tempo ou não, diferenciando simulações estáticas e dinâmicas, respectivamente. Conforme descrito em Jain

(1991) e Hu & Gorton (1997) 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 a sua totalidade. Em outras palavras, há certo nível de abstração. Contudo, é importante levar em consideração que a abstração não deve acarretar na inclusão de erros no modelo nem mesmo na exclusão de características importantes.

De forma comparativa, a simulação costuma ser menos dispendiosa e consumir menos tempo para que os índices sejam calculados, permitindo que sejam feitos quantos experimentos forem necessários. Porém, por se tratar de uma abstração de realidade, a fidelidade das medidas tende a ser menor na simulação, se compararmos com a monitoração. Além disso, da mesma forma que na monitoração, a quantidade e representatividade das amostras consideradas são muito importantes para a obtenção de resultados corretos.

Os modelos de um sistema podem ser classificados como modelos de mudança discreta e modelos de mudança contínua. De acordo com Santos (1999), esses termos descrevem o modelo e não o sistema. Os modelos dinâmicos são classificados de acordo com os instantes de tempo em que as variáveis de estado têm seus valores alterados. Na simulação contínua o sistema se altera a cada fração de tempo.

Para o estudo de caso, 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. Alguns autores a chamam de simulação de eventos discretos, exatamente para enfatizar que a discretização se refere apenas à ocorrência dos eventos ao longo do tempo.

4.7.1 Simulação

A simulação utiliza recursos matemáticos e computacionais para modelar o funcionamento de um conjunto de operações ou processos existentes no mundo real tendo um papel decisivo no projeto, análise e implementação de sistemas de comunicação, principalmente quando estes sistemas são caros e complexos. Quando se utiliza essa técnica, pretende-se simular o comportamento do sistema, para que se tenha uma ideia do seu desempenho. Com a utilização dessa abordagem, pode-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.

Alguns dos fatores que justificam o uso de técnicas de simulação são: possibilidade de atingir níveis de detalhes às vezes não permitidos em um sistema real; economia de tempo e recursos financeiros, trazendo ganhos de produtividade e qualidade; permissão para obter respostas a eventos que não ocorrem naturalmente e com frequência no sistema real.

A utilização de ambientes de simulação vem aumentando de forma significativa, 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 (GUEDES et al., 2005).

Existem diversos tipos de simuladores. Dentre eles, os dotados de interface gráfica que permitem aos usuários visualizar facilmente o funcionamento do seu ambiente simulado. Alguns destes são baseados em linhas de código e podem fornecer uma interface visual ou menos intuitiva, mas podem permitir formas avançadas de personalização. Outros tipos podem ser de programação orientada a objeto e podem fornecer uma estrutura de programação que permite aos usuários criarem um aplicativo que simula o ambiente de rede para testes.

Dentre os diversos simuladores existentes, os mais citados largamente na literatura são: o OPNET, que é um software proprietário e possui ambiente gráfico, e os outros dois, são chamados de NS-2 e NS-3 (*Network Simulator 3*), são de código aberto e seu desenvolvimento dá-se via linguagem C++ e sem interface gráfica. Nesta dissertação, foi utilizado o NS-2 na versão 2.29, que será abordado na próxima seção.

4.7.2 *Network Simulator 2 (NS-2)*

O NS-2 (*Network Simulator 2*) é um simulador de eventos discreto resultante de um projeto conhecido como VINT (*Virtual InterNetwork Testbed*). Dentre outros, compõem esse projeto a DARPA, USC/ISI, Xerox PARC, LBNL, e a universidade de Berkeley. Uma grande vantagem do NS-2 reside no fato de ele ser totalmente gratuito e com código fonte aberto, o que permite ao usuário proceder aos ajustes que julgar necessários. O NS-2 oferece suporte à simulação de um grande número de tecnologias de rede (com e 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 muito mais (NETWORK SIMULATOR - NS-2, 2014).

A programação do NS-2 é feita em duas linguagens: C++ para a estrutura básica (protocolos, agentes, etc) e OTCL (*Object-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 NS-2. Nela serão efetivamente escritas as simulações. O motivo para se utilizar duas linguagens de programação baseia-se em duas diferentes necessidades. De um lado, por existir a necessidade de uma linguagem mais robusta para a manipulação de bytes, pacotes e, de outro, para implementar algoritmos que rodem um grande conjunto de dados. Nesse contexto, C++, que é uma linguagem compilada e de uso tradicional, mostrou-se a ferramenta mais eficaz (idem, 2014).

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.

4.8 Considerações Finais

Neste capítulo, conclui-se que avaliar o desempenho faz parte do processo do ciclo de vida de qualquer sistema e exige uma atenta definição da metodologia e ferramentas, para que a escolha seja funcional e intuitiva. A apresentação das diferentes técnicas de modelagem fornece um amplo conjunto de opções, que dependem do estágio do desenvolvimento do sistema alvo.

O processo de modelagem é uma ótima técnica para permitir que o sistema, este nem sempre passível de instrumentação, seja analisado através de abstrações que representam sua dinâmica. Este processo consiste de várias etapas inter-relacionadas. Nesta dissertação, enfatiza-se a abordagem baseada em simulação discreta.

Há diversas taxonomias propostas para a área de avaliação de desempenho, entretanto, não há consenso acerca da classificação e agrupamento das técnicas. Sequer há consenso na nomenclatura acerca dos termos “modelagem”, “soluções” e “métricas”. Apesar disso, optou-se por adotar uma das referências das mais citadas pelos pesquisadores da área: Jain (1991). Entretanto, não é intenção esgotar o tema; portanto, recomenda-se consultar Pidd (1998), Lewis & Papadimitriou (1997) e Hu & Gorton, (1997), para haver uma visão mais abrangente da área.

CAPÍTULO 5 – TRABALHOS RELACIONADOS

5.1 Considerações Iniciais

Com o intuito de discutir e motivar novas pesquisas, apresentam-se alguns trabalhos que demonstram os desafios mais amplos de *femtocells*, no que diz respeito às possíveis soluções para cobertura e “descarregamento” das redes *macrocell* e nas propostas de modelos de alocação e otimização aliado aos esforços para economia de energia, as chamadas *Green networks*.

5.2 Levantamento de Trabalhos Considerados mais Relevantes

A explosão do uso de dispositivos e aplicações móveis nos últimos anos tem levado a uma sobrecarga da infraestrutura da rede responsável pelo escoamento desse tráfego, afetando tanto o desempenho da rede quanto a experiência do usuário. Um dos elementos-chave nas redes LTE é a possibilidade de implantação de múltiplas *femtocells* para a melhoria de cobertura e taxa de dados. Nesse sentido, em Silva (2014) é proposta uma metodologia para o estudo do impacto do *handover* em redes LTE com *femtocells*. O estudo teve por objetivo promover uma discussão quanto à efetividade da integração de *femtocell* em redes LTE, considerando a questão da viabilidade da tecnologia como uma interface para melhoria da cobertura e qualidade de serviço em ambientes indoor.

Estudos realizados por Lee (2010) mostram que a implantação de *femtocells* pode ter um impacto indesejado sobre o desempenho na *macrocell*. A alocação de recursos 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 OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*). É dada especial atenção ao uso de possíveis técnicas de autoconfiguração e auto-otimização para evitar a interferência.

Em Raheem et al. (2014) é feito um estudo de implantação de *femtocells* móveis em redes LTE. As *femtocells* móveis podem ser implantadas em veículos de transporte público, como trens, ônibus ou, ainda, em carros particulares, pois formam sua própria célula no interior dos veículos para atender os equipamentos do usuário. Dois cenários foram considerados, no caso de *femtocells*/fixo-móvel. O desempenho do *Femtos Fixo* e *Femtos Móveis* foi investigada, bem como a borda da célula. O desempenho dos UEs (*User Equipment*) foi melhorado após a adição de *Femtos Fixo* e *Femtos Móveis*. No entanto, UEs

móveis tenham um melhor desempenho depois de adicionar os *Femtos* Móveis uma vez que podem chegar a áreas que *Femtos* Fixo não pode alcançar.

À medida que as redes celulares estão se tornando mais complexas, o consumo de energia da infraestrutura da rede inteira está se tornando importante não só em termos de custos operacionais, mas também em impactos ambientais. Em Chen et al. (2013), investiga-se a eficiência energética das redes *femtocell* combinando teoria dos jogos e aprendizagem estocástica. Com a formulação do jogo *Stackelberg*, no processo de aprendizagem, as *macrocells* atuam como líderes e as *femtocells* como seguidoras. Neste trabalho, propõem-se dois algoritmos inteligentes baseados na aprendizagem para agendar níveis de potência estocásticos de cada célula. Experimentos numéricos são apresentados para validar as investigações. Os resultados mostram que os dois algoritmos de aprendizado melhoram substancialmente a eficiência energética das redes *femtocell*.

Andrews (2012) oferece uma ampla e detalhada revisão da literatura: destaca as principais características sobre a tecnologia *femtocell* e fornece um levantamento quanto a questões técnicas, de negócio e regulamentos.

Existem dois tipos de alocações de frequências em redes *femto-macro*: alocação com canais dedicados e alocação co-canal. No modo de canal dedicado, diferentes canais de frequência são atribuídos à *femtocell* e à *macrocell* e não há interferência entre elas. Este método, contudo, pode desperdiçar recursos, já que nem sempre existirá uma *femtocell* utilizando o canal reservado. Por outro lado, o método de co-canal atribui o mesmo canal de frequência para o *femtocell* e macrocélula. A alocação co-canal resulta em uso mais eficiente do espectro, facilita o processo de *handover* e o processo de busca por células, mas pode ocorrer a interferência entre a *femtocell* e macrocélula que, se não for administrada, pode degradar significativamente a qualidade do sinal (SUNG et al., 2008).

Em Demirdogen et al. (2010) e Claussen, (2007; 2008), os resultados das simulações comparando os modos de alocação de frequências, mostram que não existe qualquer combinação de canal dedicado que seja superior à alocação co-canal. Em outras palavras, apesar do problema da interferência, a alocação co-canal é mais eficiente.

Originalmente as *femtocells* foram projetadas principalmente para ambientes domésticos, mas também podem ser uma solução rentável para as empresas por conter características de auto-organização. Em Mhiri et al. (2011) é apresentado um algoritmo de redes verdes em *femtocells*. Trata-se de um algoritmo automatizado e descentralizado de configuração e gerenciamento de conjuntos de estações base *femtocell* autônomas. O sistema implementa a autoconfiguração e a auto-otimização para gerenciamento de energia

comparado com sistemas centralizados existente, em que uma central de gestão de dispositivo calcula a informação. Essa abordagem aumenta a confiabilidade porque elimina o ponto central de falha e pode aumentar desempenho devido à comunicação e ao processamento paralelo, mostrando a capacidade de otimizar a cobertura e, conseqüentemente, o consumo de energia substancial resultante.

Vários autores têm publicado modelos ou algoritmos de comunicação verde em redes móveis. Em Chee et al. (2011) investiga-se de que forma as *femtocells* podem fazer redes celulares convencionais mais “verdes”. A pesquisa apresenta um *framework* de modelagem energética, para avaliar o consumo total de energia em uma rede celular a partir da utilização de *femtocells*. Consideram-se vários ambientes de rede, incluindo a propagação *indoor*, a distribuição de usuários perto das *femtocells*, e uma política de acesso que tem efeito sobre o desempenho da rede. Os resultados das simulações nos diversos ambientes propostos mostraram que, no geral, uma tecnologia mais verde reduz o consumo total de energia em uma rede celular. Foram obtidos o desempenho do sistema e o consumo de energia para três cenários diferentes: *femtocell* com diferente taxa de conexão, diferente taxa de acesso aberto e célula com diferentes coberturas. Também foi possível identificar diretrizes que ajudam as operadoras na implantação e gerência de uma rede celular com *femtocells*, de maneira mais ecológica.

Em Salem & Reguida (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. Acrescentam, ainda, que o objetivo específico envolve a investigação e a 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 de grande poder de redução no consumo de energia. Além disso, o recente desenvolvimento de hierarquias para alocação de usuários em redes Macro/Femto em banda larga baseada em acesso sem fio vem chamando a atenção dos prestadores de serviços devido à sua cobertura *indoor* melhorada. O artigo não dá atenção para maximizar o uso de bateria dos clientes, considerando os aspectos de QoS e QoE.

Em Kong (2014) é apresentada uma proposta de redução da emissão de CO₂ de uma rede sem fio, ativando e desativando recursos da estação base, através de um processo markoviano de decisão de tempo discreto para a tomada de decisão em cada época, ativando, desativando ou mantendo os recursos. A política proposta pode reduzir em até 50% o consumo de energia, sem comprometer qualidade de serviço, que é avaliada através

da probabilidade de bloqueio. Porém o estudo não se preocupa com o consumo de energia dos nós clientes e não considera os aspectos QoE.

Já em Almeida et al. (2013) é apresentada uma proposta de alocação otimizada de usuários em uma rede macro-femto co-canal, visando maximizar o QoS das aplicações e eficiência energética, buscando o conceito de redes verdes. Dessa forma, é utilizado um sistema de inferência *fuzzy*, formulado para definir à qual rede o dispositivo móvel deve se conectar. Os resultados mostram que, em comparação com abordagens tradicionais de QoS, o modelo proposto pode melhorar a eficiência energética em até 25%. No entanto, o trabalho não utiliza uma política para alocação dos usuários e também não traz avaliação de QoE.

Em Souza (2013), é analisado o uso racional de recursos, principalmente de energia. Propõe-se a utilização de medidas de eficiência energéticas já existentes, aperfeiçoando-as e/ou adaptando-as para outras áreas. Sugere-se, como exemplo, a maximização da quantidade de bits transmitidos para cada unidade de energia consumida pela rede, considerando os requisitos dos padrões de redes sem fio macrocelulares e, utilizando como cenário de aplicação, redes de comunicações de múltiplo acesso por divisão de código (CDMA).

A literatura da área está voltada principalmente para a eficiência energética das células macrocélulas e *femtocélulas*, sem muita atenção dedicada a maximizar o uso de bateria de nós clientes, considerando os aspectos de QoS e QoE. A proposta desta dissertação visa à validação de um modelo que considere os itens anteriores, através de simulação discreta.

5.3 Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentados trabalhos que ilustram o estado da arte de técnicas e modelos empregados em redes *femtocell* e em otimização de redes verdes, a fim de demonstrar a diversidade de estratégias que vêm sendo aplicadas para esse fim. Objetivou-se também demonstrar lacunas existentes na literatura que poderão ser utilizadas como objeto de estudo desta dissertação.

CAPÍTULO 6 – METODOLOGIA

6.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo será apresentada a estratégia que foi utilizada para montar os cenários. Para execução deste trabalho foi necessário seguir uma determinada metodologia de forma que os resultados viessem coerentes com o que se pretendia analisar, desta forma podemos verificar um fluxograma que descreve as etapas executadas durante este trabalho. A Figura 11 apresenta a sequencia na qual o trabalho foi desenvolvido.

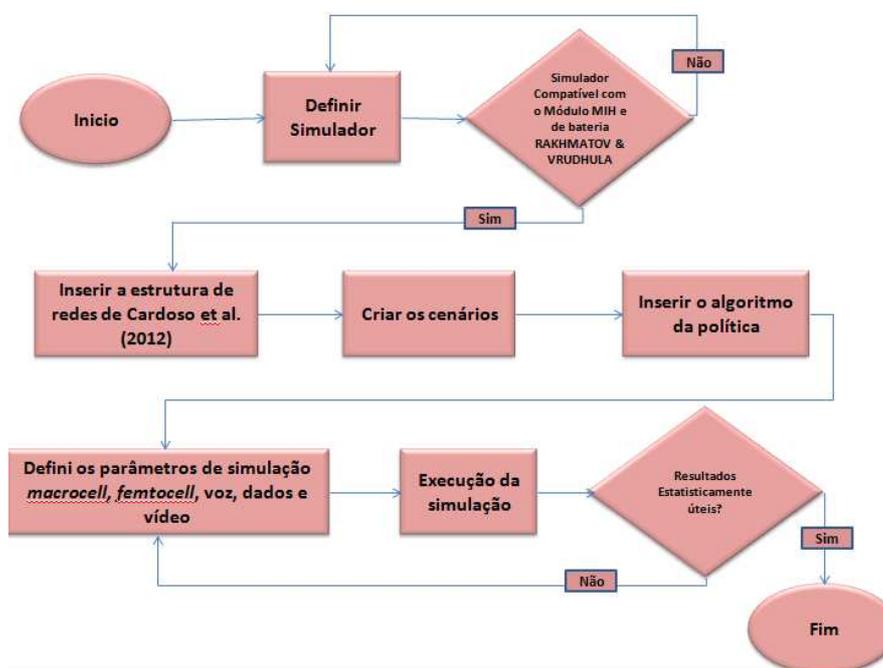


Figura 11. Fluxograma da metodologia proposta

Inicialmente foram estudados os softwares existentes para simulação discreta compatíveis com os módulos MIH e de bateria de Rakhmatov – Vrudhula. Feito a determinação do software, iniciou-se o processo de configuração da estrutura de rede, em seguida foram configurados os cenários de teste da simulação e inserido o algoritmo da política. Adiante, foram criados três cenários distintos para os testes da simulação (*macrocell*, *femtocell* e política). Posteriormente foram definidos os parâmetros de simulação da *macrocell*, *femtocell*, e das aplicações de voz, dados e vídeo. Por fim, foi executada a simulação e realizado as coletas dos resultados. Os principais métodos utilizados nesta dissertação serão abordados nas seções abaixo.

6.2 Simulador de Redes

Como mencionado na subseção 4.7.1 desta dissertação, existem vários simuladores de redes, O NS-2 na versão 2.29 foi escolhido por ser de código aberto e pelo fato de poder adicionar os seguintes módulos:

1. Módulo MIH: este módulo foi baixado do site do NIST (NIST, 2013) e 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 de redes NS-2.
2. Módulo de bateria não-linear de Rakhmatov-Vrudhula: este é considerado o modelo de bateria mais realista, pois esse modelo consegue capturar as principais propriedades da bateria, e descreve adequadamente os seus efeitos não-lineares que ocorrem durante uma corrente de descarga. O modelo de Rakhmatov-Vrudhula foi adaptado neste trabalho para baterias de íons de lítio. A escolha da utilização de baterias de íons de lítio é devido à maioria dos dispositivos móveis na atualidade utilizarem esse tipo de bateria (COSTA NETO, 2011).

No simulador NS-2 foi feita uma adaptação de um *access point* Wi-Fi para que se comportasse como um *access point femtocell (Home NodeB)*. Diante disso, foi possível inserir no simulador a estrutura de rede que será abordado na próxima seção.

6.3 Estrutura da Rede

Foi utilizada na simulação a estrutura da rede móvel presente no artigo de Cardoso et al. (2012). A estrutura da rede móvel visa a atender a estação móvel que se comunica com as células *macrocell* e *femtocell*, por meio do ponto de acesso *femtocell* que é conectado à rede da operadora do usuário, através da conexão banda larga DSL existente na residência e pela ERB (que é responsável por fornecer o acesso pelo gerenciamento das estações clientes), as quais fornecem o acesso sem fio conforme a Figura 12.

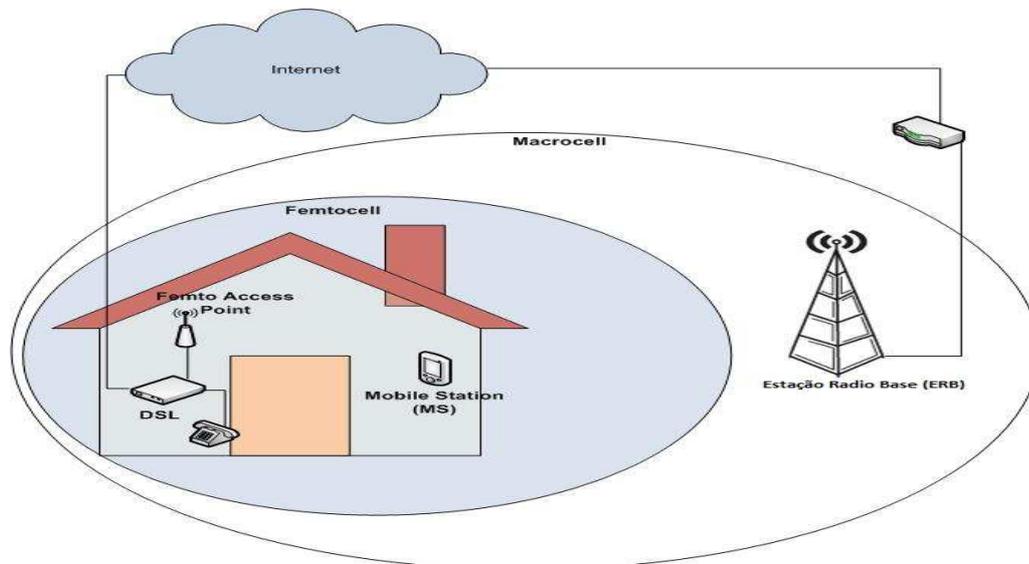


Figura 12. Cenário *macrocell* e *femtocell* que está sendo levado em consideração.

As chegadas de chamadas podem ser atendidas por ambas as redes, que têm diferentes distâncias para os nós móveis, diferentes larguras de banda, perdas e diferentes usuários máximos que podem ser conectados.

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 decidir qual a rede deve ser escolhida para servir à chamada. Caso novas chamadas sejam bloqueadas devido à limitação de capacidade, estas serão encaminhadas para outra rede de serviço possível.

Há duas classes de serviço de acesso à rede: voz e dados. Elas são formadas por novas chamadas e chamadas de *handover*. Esses pedidos chegam ao sistema de acordo com dois processos de Poisson e com parâmetros λv_n e λd_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 à 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 qualquer 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 para fazer uma chamada de voz ou de dados, a estação móvel tem que decidir em qual rede conectar, utilizando as informações de 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.

Utilizando a estrutura de rede representada pela Figura 12, foram criados três cenários. Nas duas próximas seções, serão descritos os cenários e a estrutura da política aplicada para análise da simulação.

6.4 Cenários

Foram criados três cenários que são descritos na Tabela 5. Em todos os cenários a arquitetura proposta na subseção 6.3 é utilizada. Foram especificadas distâncias de 20 (vinte) metros entre o usuário móvel e a *femtocell* e de 480 (quatrocentos e oitenta) metros entre o usuário móvel e a *macrocell*. Portanto, o usuário está na área de cobertura de ambas as células. No primeiro cenário (*macrocell*), os utilizadores transmitem apenas nesta rede; no segundo (*femtocell*), apenas a rede *femtocell* pode ser usada como saída e, no terceiro (política), as redes *macrocell* e *femtocell* podem ser usadas, mas a escolha é feita pela política. Todos os cenários foram utilizados para avaliar o consumo de energia e as métricas de QoS e QoE.

Tabela 5. Cenários Testados

Cenários	Números de Usuários	Tempo de Simulação (S)	Número de Repetições	Intervalo de Confiança (%)
Macrocell	15	70	30	95
Femtocell	15	70	30	95
Política (Macrocell/Femtocell)	15	70	30	95

6.5 Política

A política visa a encaminhar as chamadas à rede *femtocell* até que esta tenha esgotada sua capacidade. Depois do esgotamento da capacidade desta rede, as chamadas são encaminhadas à rede *macrocell*. Uma vez esgotadas ambas as redes, as chamadas são bloqueadas. A cada chamada terminada, abre-se uma vaga nesta rede que deve ser preenchida com uma nova chamada, sendo priorizando a rede *femtocell* (Figura 13).

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 da política markoviana é representado na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6. 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: }
```

Como forma de facilitar o entendimento do fluxo de cada chamada que entra no sistema, foi montado um fluxograma explicando passo a passo como uma chamada é atendida, representado na Figura 13.

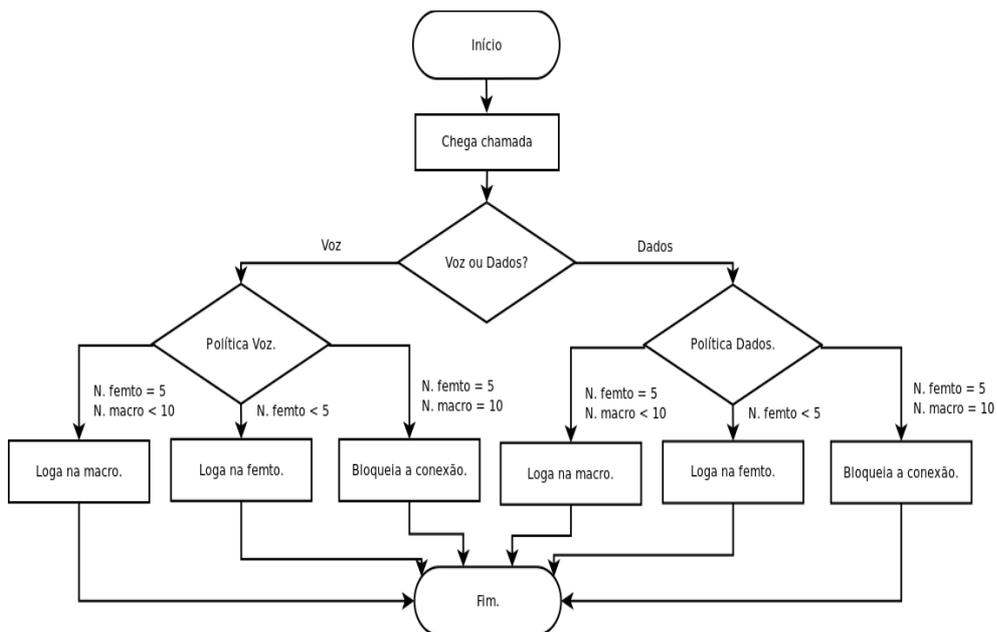


Figura 13. Fluxograma da política

A política mostrada no fluxograma da Figura 13 funciona nos seguintes passos:

1. Inicia a simulação;
2. Chega uma chamada;
3. Identifica se a chamada é de voz ou de dados;
4. A chamada segue para a política de voz ou a política de dados;
5. A rede identifica se o número de chamadas na *femtocell* é menor que 5;
6. Se atender ao passo cinco, conecta a chamada na *femtocell*;

7. Senão, a rede identifica se os números de chamadas são iguais a cinco e menor que dez na *femtocell* e *macrocell* respectivamente;
8. Se atender ao passo oito, 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, as próximas chamadas recebidas serão bloqueadas na rede;
10. Finaliza simulação.

O algoritmo genérico da política markoviana foi inserido através do módulo MIH adicionado no NS-2. Assim, o objetivo é que, através da política, o usuário se conecte na rede fornecedora de melhores resultados das métricas de QoS, QoE e de redução de consumo de bateria para o dispositivo móvel. Nas seções a seguir, serão abordados os parâmetros de simulação utilizada nessa dissertação.

6.6 Parâmetros da Simulação

Os nós móveis iniciaram a simulação ligado a *macrocell*. Durante o período, houve mudança para a cobertura *femtocell*. Quinze usuários foram incluídos no cenário. A simulação durou 70 segundos, e foi repetida 30 vezes, com intervalo de confiança de 95%. O valor inicial para o consumo de energia da bateria na simulação foi de 1000 Joules (FERREIRA JUNIOR, 2013; COSTA NETO, 2011). Os parâmetros de configuração das tecnologias *macrocell*, *femtocell* e o parâmetros das aplicações voz, dados e vídeos são apresentados nas Tabelas 7, 8 e 9 a seguir.

Tabela 7. Parâmetros da *Macrocell* e *Femtocell* (FERREIRA JÚNIOR, 2013)

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	75 Mbps	54 Mbps
Raio de Cobertura	1 km	50 m

Tabela 8. Parâmetros das Aplicações Voz e Dados (ALMEIDA et al., 2013)

Parâmetros	Voz	Dados
Tamanho do Pacote	244 bits	1024 bits
Taxa de Dados	12,2 Kbps	144 Kbps
Protocolo	UDP	UDP

Tabela 9. Parâmetros da Simulação com Vídeo (EVALVID, 2014; FERREIRA JÚNIOR, 2013)

Vídeo	Resolução: 352 x 288 Taxa de Frames: 30 frames/s Modo de Cor: Y, U, V
Fila	<i>Drop Tail</i> (40 ms delay)
Tamanho do Pacote	1052 bytes
Fragmentação Máxima do Pacote	1024 bytes
Tempo de Simulação	70 segundos
Intervalo de Confiança	95 %
Número de Usuários	15

O vídeo utilizado na simulação foi o “*Akiyo*”, que possui 300 *frames* no formato YUV com dimensão de 352x288. Foi codificado com o *MPEG-4 CODEC* a uma taxa de 30 frame/s (YUV, 2014).

Para a transmissão de vídeo foi utilizada a ferramenta *Evalvid* na versão 2.7 (EVALVID, 2014); o vídeo simulado foi avaliado usando a ferramenta MSU (*Video Quality Measurement Tool*), (MSU, 2014). A análise da qualidade do vídeo para os cenários *femtocell*, *macrocell* e política foi feito através dos resultados das métricas PSNR, VQM e SSIM que já foram descritas na seção.

Os procedimentos para as simulações com vídeo foram:

1. Conversão do vídeo para arquivo de trace no Evalvid;
2. Leitura do trace do vídeo para simulação no ns-2;
3. Reconstrução do vídeo através do trace de saída obtido na simulação;
4. Avaliação do vídeo na ferramenta *MSU Video Quality Measurement Tool*.

6.7 Considerações Finais

O atual capítulo apresentou a metodologia da presente dissertação. Os principais métodos utilizados para a escrita desse trabalho foram baseados em estudos dos principais simuladores de redes. Foram estudados os modelos de baterias para dispositivos móveis. Em seguida, buscou-se o entendimento da arquitetura de rede, enfatizando o estudo dos dispositivos de redes inseridos nessa arquitetura. Logo após, foram definidos os cenários para os testes da simulação e a introdução do algoritmo da política através do módulo MIH adicionado no NS-2. Por fim, foram descritos o parâmetros da simulação.

CAPÍTULO 7 – RESULTADOS

7.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, são apresentados os resultados da análise da simulação. No primeiro caso descrito, analisa-se a descarga da bateria dos nós clientes em cenários femtocell, macrocell, com e sem política. Em seguida, demonstram-se os valores dos resultados das principais métricas de QoS e QoE avaliadas durante a simulação.

7.2 Avaliação do Consumo de Bateria e das Métricas de QoS

Ao analisar o comportamento das redes em termo de rendimento energético (Figura 14), pode-se observar uma eficácia na utilização do modelo proposto, pois a descarga da bateria para as ligações destinada a rede femtocell, foi de aproximadamente 1%, enquanto as ligações encaminhadas à rede macrocell, apresentaram um gasto de aproximadamente 1,5%. Ao implementar o modelo de alocação com a política a descarga energética foi aproximadamente 1,2%.

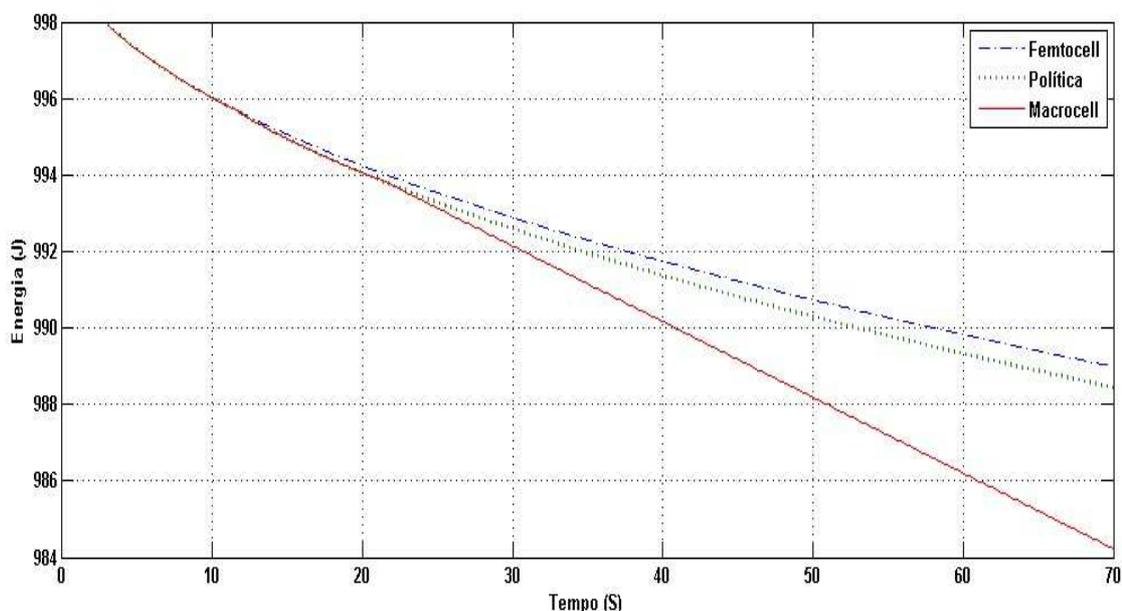


Figura 14. Gráfico do consumo de bateria

Os valores obtidos para o modelo condizem com o esperado, pois se previa uma porcentagem de consumo que se enquadra entre as duas outras tecnologias testadas (*femtocell* e *macrocell*), significando que o modelo está direcionando as chamadas à rede mais adequada, alcançando níveis de eficiência energética em relação à rede *macrocell*, em que se observa uma redução do consumo em 4%.

O objetivo da política de alocação proposto envolve possibilitar soluções para o melhor consumo da energia e garantir um serviço de qualidade aos usuários. Para tanto, foram analisados parâmetros de QoS das aplicações como atraso e *jitter* (Tabela 10): As chamadas bloqueadas também serviram como parâmetro para este trabalho, como forma de identificar qual rede atendeu efetivamente mais chamadas (Tabela 10).

Tabela 10. Medidas de Desempenho (Médias)

Simulação	Atraso (ms)	Jitter (ms)	Perda de Pacote (%)	Chamadas Bloqueadas
Femtocell	1180	10,3	0,0	498
Macrocell	2400	17,2	0,0	495
Política	800	5,7	0,0	496

Vale ressaltar que a alocação do usuário pela política obtém melhorias nas medidas de desempenho. Em média, houve uma diminuição de 66% no atraso obtido em relação à rede *macrocell* e de 32% em relação à rede *femtocell*. Para a medida de desempenho *jitter*, obteve-se aproximadamente uma redução de 66% relacionado à rede *macrocell* e de 44%, à rede *femtocell*. Também a política obteve uma redução 0,4% no bloqueio de chamadas em relação à rede *femtocell* e um aumento de, aproximadamente 0,2%, à rede *macrocell* (Tabela 10). A simulação visava à análise da política no aspecto de carga mínima. Com isso, não houve perda de pacotes no resultado da simulação devido ao modelo aplicado. Contudo, teoricamente utilizando uma rede com alta carga, os resultados serão os mesmos.

À vista disso, pode-se observar que a política reduziu o consumo de energia e o bloqueio de chamadas e proporcionou, ainda, melhores medidas de desempenho às redes *macrocell* e *femtocell*.

7.3 Avaliação de QoE

Os resultados a seguir avaliam o desempenho com base nas métricas de Qualidade de Experiência. É possível verificar um ganho na qualidade do vídeo transmitido nas simulações em que a política foi aplicada. Nos cenários sem *femtocell* e *macrocell*, a qualidade do vídeo durante as transmissões foi considerada uma aplicação de vídeo de péssima qualidade. A política aplicada garantiu uma boa qualidade do vídeo, ofereceu a melhor conectividade disponível e descartou os pacotes menos importantes. Ao analisar a métrica PSNR, os valores para *femtocell*, *macrocell* e política, foram, respectivamente, de

26dB, 20dB e 45dB. A Figura 15 exibe o resultado para a métrica PSNR. Para que um vídeo seja considerado de boa qualidade deve ter um valor médio de PSNR no mínimo de 30dB.

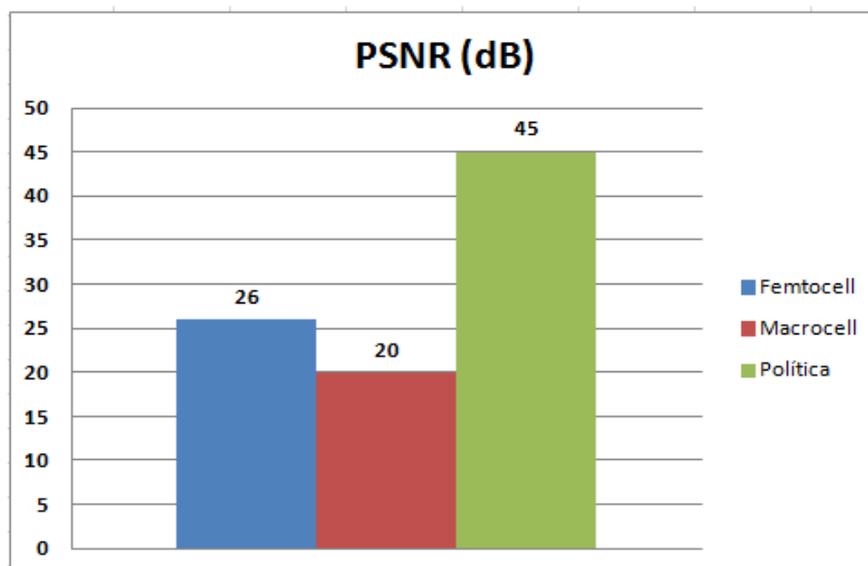


Figura 15. PSNR

Além da avaliação de PSNR, outro resultado que também comprova os benefícios da política é a métrica objetiva SSIM, que analisa a similaridade de cores, luminosidade e estrutura. Essa métrica é eficiente em extrair informações visuais das imagens/vídeos e não em extrair taxa de erro. O valor de SSIM é expresso como um valor decimal entre 0 e 1. Quanto mais próximo do 0, pior é a qualidade do vídeo; quanto mais próximo de 1, melhor é a qualidade do vídeo.

A política obteve o valor de SSIM de 0,98. Já no cenário *femtocell* e *macrocell* os valores foram de 0,93 e 0,90, respectivamente. A Figura 16 exibe os resultados para a métrica SSIM.

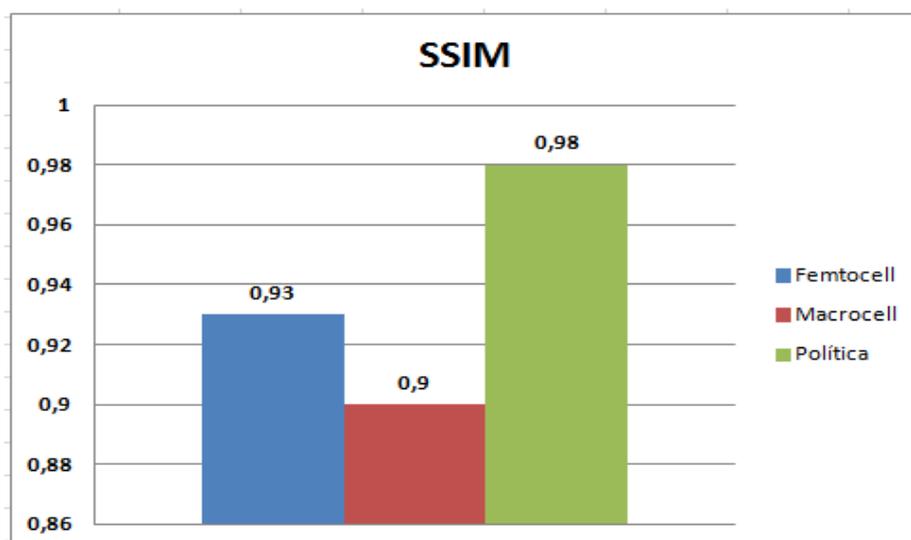


Figura 16. SSIM

A métrica objetiva *Video Quality Metric* (VQM), considerada mais completa que a métrica SSIM e PSNR, também comprova o melhor desempenho da política. Na métrica VQM, quanto mais próximo o valor de zero, melhor é a qualidade. A política apresentou valor de VQM de 0,5, contra, respectivamente, 1,7 e 3 da *femtocell* e *macrocell*. A Figura 17 exibe o gráfico com os valores de VQM.

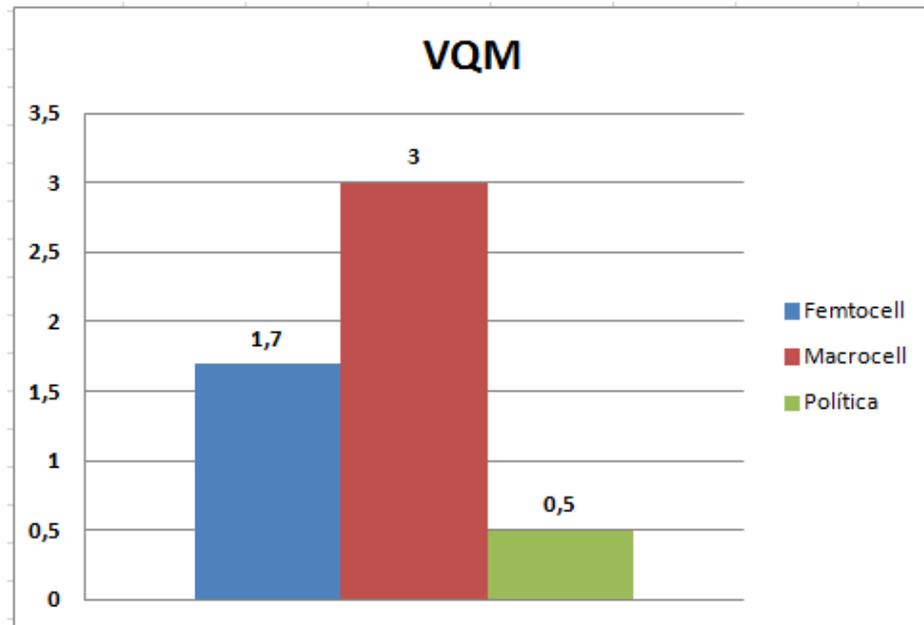


Figura 17. VQM

Quando comparamos os *frames* do vídeo recebido nos cenários *femtocell*, *macrocell* e política, é possível verificar visualmente uma melhor qualidade dos *frames* recebidos no último caso. As Figuras 18, 19 e 20 mostram o *frame* 28 do vídeo recebido.



Figura 18. Frame 28: cenário *macrocell*

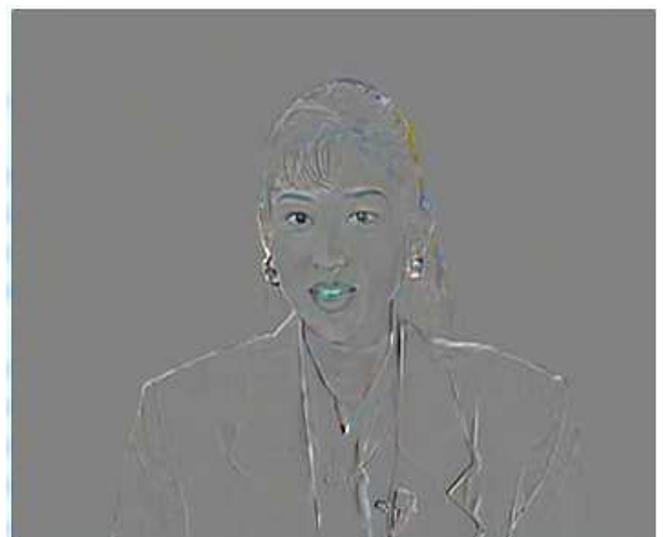


Figura 19. Frame 28: cenário *femtocell*



Figura 20. *Frame 28:* cenário política

7.4 Considerações Finais

Este capítulo apresentou as avaliações da arquitetura através de resultados obtidos via simulação. Os resultados mostraram que a política proporcionou rendimento energético aos nós clientes e proveu a eles melhoras em relação às métricas de QoS avaliadas na simulação. Os resultados comprovaram os benefícios por métricas de QoE e também através da visualização da qualidade dos *frames* dos vídeos transmitidos.

CAPÍTULO 8 – CONCLUSÃO

8.1 Considerações Finais

Com a evolução das comunicações móveis e o surgimento de novas aplicações, mais exigentes em termos de largura de banda, tornam-se indispensáveis estudos sobre os parâmetros de QoS e influência da mobilidade dos usuários em tais sistemas. Como reflexo dessa evolução, a procura por serviços de banda larga móvel por parte dos utilizadores tem crescido de forma contínua e a um ritmo exponencial. Isso faz com que as operadoras estejam constantemente investindo em diversas soluções para prover aumento de capacidade em redes móveis. Nesse contexto, a adoção de *femtocells* vem sendo proposta como uma possível alternativa para atender a essas limitações.

Os futuros sistemas de comunicação móvel exigirão taxas de dados muito mais elevadas, que podem consumir mais energia, em comparação com os sistemas atuais 3G e 4G. Tais restrições trazem ao estado da arte a discussão acerca de *green networks* e eficiência energética, tanto para fins de planejamento quanto para gerência e operação das redes. Assim, o domínio dessas questões é considerado como um fator muito importante para a concepção de sistemas de comunicação futura. Nesse contexto, o uso inteligente da conexão do usuário entre *macrocell* e *femtocell* define sempre a procura por QoS e o baixo consumo de energia. Além disso, a redução do consumo de energia de EBs (Estação Base) e MSs pode contribuir diretamente para reduzir a emissão de CO₂.

Este trabalho apresentou a validação do modelo da política markoviana de (CARDOSO, 2012) que contribuem para planejamentos mais eficientes de redes que aderem aos conceitos de *green networks*. A implementação da política combina os potenciais de soluções analíticas markoviana e modelos de simulação discreta, objetivando minimizar o consumo de baterias dos usuários, sem afetar a qualidade de serviço das aplicações, para alocação de usuários em redes *macrocell* e *femtocell*.

A partir dos resultados apresentados na simulação, a política obteve uma economia significativa no consumo energético, além de melhorar a qualidade de serviço em relação às redes *macrocell* e *femtocell*, demonstrando-se eficaz, de modo a alterar diretamente as métricas de QoS e de QoE.

8.2 Contribuições da Dissertação

As principais contribuições desta proposta até o momento são:

- Avaliação do modelo da política no simulador.

- Avaliação do modelo de consumo de energia de bateria não linear.
- A partir do Programa de Cooperação Acadêmica (PROCAD/CAPES), o autor desta dissertação passou parte do período deste trabalho de mestrado na cidade de São José dos Campos (São Paulo), onde realizou estudos no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e no Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA). Como resultado e contribuição, fortaleceram-se os laços de cooperação entre as instituições UFPA, INPE e ITA;
- A divulgação do trabalho por meio de publicação de artigos em conferência internacional, em que foram apresentados a proposta e os resultados do estudo de caso desta dissertação. Estes artigos foram aceitos e publicados no primeiro semestre de 2014. São eles:
 - **CARDOSO, J. A. S.; CARDOSO, DIEGO LISBOA; SILVA, MARCELINO SILVA DA; FERREIRA JUNIOR, J. J. H.; SANTANA, Á. L.; FRANCÊS, C. R. L. Green Markov - a Hybrid Markovian Policy Approach and Discrete Event Simulation for the Allocation of Users When Planning a Macro-Femto.** Aceito para publicação no TPMC 2014: *Theory and Practice in Modern Computing*, Lisboa (Portugal), 2014.
 - NATAL, I. P.; **CARDOSO, J. A. S.; CARDOSO, Diego Lisboa; SILVA, Marcelino Silva da; FERREIRA JUNIOR, J. J. H.; SANTANA, Á. L.; 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.** Aceito para publicação no WPerformance: *XIII Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação*, Brasília (Brasil), 2014.

8.3 Trabalhos Futuros

Podem ser destacados como desdobramentos futuros para esta tese os seguintes aspectos:

- Adicionar novas tecnologias a arquitetura para aumentar as oportunidades de conectividade aos usuários móveis;

- Realizar extrapolações dos cenários da simulação, aproximando ainda mais de situações reais;
- Realizar estudos utilizando outros simuladores como o NS-3 para comparar os resultados.

8.4 Dificuldades Encontradas

Durante o desenvolvimento da tese foram encontradas dificuldades, relatadas com o objetivo de auxiliar novos estudos nesta mesma linha de pesquisa que venham utilizar os conhecimentos desta tese.

Entre as principais dificuldades podemos citar:

- A dissertação envolveu várias linhas de pesquisas. Requereu um estudo da arte detalhado sobre redes móveis, sobre as técnicas de avaliação de desempenho e também um estudo sobre simuladores de eventos discretos. A dissertação envolveu também estudo sobre as tecnologias *femtocell*, WiMAX e LTE.

- Um estudo aprofundado sobre a ferramenta de simulação de evento discreto e, conseqüentemente, um estudo aprofundado em linguagens de programação para que os mecanismos propostos fossem desenvolvidos.

- A repetição de quantidade de simulações. Houve um grande consumo de tempo de execução e gerou-se uma grande quantidade de dados a serem filtrados para que se chegasse a um resultado final.

Ao optar por uma dissertação em uma linha de pesquisa abrangente a fim de solucionar um problema de eficiência energética para dispositivos móveis sem afetar a características da rede, distribuem-se melhor os usuários e, ao mesmo tempo, assegura-se a qualidade de serviço das medidas de QoS e QoE. No entanto, encontrou-se uma série de dificuldades que foram: desde um estudo intenso da literatura para que a partir disso fosse possível elaborar uma proposta de dissertação, assim como, um estudo intenso para que o desenvolvimento da mesma gerasse resultados significantes à área de pesquisa.

REFERÊNCIAS

3GPP. ETSI TS 122.220. **Service requirements for Home Node B (HNB) and Home eNodeB (HeNB)**: 3GPP Technical Specification. 2011.

3GPP TR 36.814 V9.0.0, Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (release 9). Disponível em <<http://www.qtc.jp/3GPP/Specs/36814-900.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2014.

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) 2010a. Disponível em: <http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136300/08.12.00_60/ts_136300v081200p.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2014a.

3GPP TS 25.467, **UTRAN architecture for 3G Home NodeB (HNB)**; Stage 2; (Release 9), 2010.

ALMEIDA L.; MONTEIRO F.; SILVA M.; NATALINO C.; SANTANA Á.; FRANCÊS C.; CARDOSO D.. *Green-fuzzy* – implementação de um modelo de alocação de usuários em redes macro-femto co-canal: uma abordagem baseada em simulação”. **XLV SBPO Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. Natal: [s.n], set. 2013.

ANATEL, Agência Nacional de Telecomunicações. **Brasil fecha março de 2014 com 273,58 milhões de acessos móveis**. 2014. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirportalinternet.do>>. Acesso em: 24 abril 2014a.

ANATEL aprova regulamento de *femtocell*. Disponível em: <<http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=80&data=04/11/2013>>. Acesso em: 20 jun. 2014b.

ANDREWS, J. G. et al. Femtocells: past, present and future. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**. v.30, n.3, 2012.

BROADBAND. Disponível em: <www.broadband-forum.org>, acesso em 18 out. 2013.

BOULHOSA R.; CARVALHO T.; J. JUNIOR J. J.; PASSOS D., DIAS L. K.; CERQUEIRA E. Gerenciamento de *handover* transparente com suporte integrado a QoS/QoE em redes heterogêneas. **WPerformance - X Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação**. 2011.

BOLCH, G. et al. **Queuing networks and Markov chains**: modeling and performance evaluation with computer science applications. New York: John Wiley & Sons, 1998.

CAI, H.; JIANG, Z.; WAN, F.; LI, W.; LIU, Y; ZHANG, L. **Interference and performance analysis of coexistence between femtocells and Td-Scdma Hsdp**, 2010.

CARDOSO L. D.; SANTANA L. A.; MARCELINO S. S.; FRANCÊS L. R. C.; COSTA A. W. J. Green-Markov models - new optimization strategies: a case study for user allocation in co-channel macro/femto networks. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**. 2012.

CISCO, Cisco Virtual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2013-2018. Disponível em: <[http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_aper_c11-520862.html](http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.html)>. Acesso em: 05 abr. 2014.

CHANDRASEKHAR, V.; ANDREWS, J. G. Femtocell Networks: A Survey. **IEEE Communication Magazine**. v. 46, Issue 11, 2008.

CHANDRASEKHAR, V.; ANDREWS, G. J. Femtocell networks: a survey. **IEEE Communication Magazine**. v. 46, Issue 11, 09/08.

CHEE, D.; KANG, S. M.; LEE, H.; CHUL JUNG, C. B. **A study on the green cellular network with femtocells**. ICUFN, 2011.

CHEN, J. et al. **Femtocells: architecture & network aspects**. [S.l.]: Whitepaper, 2010. Disponível em: <<http://www.qualcomm.com/media/documents/files/femtocells-architecture-network-aspects.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2014.

CHEN, X.; ZHANG, H.; CHEN, T.; LASANEN, M.; PALICOT, J. **On improving energy efficiency within green femtocell networks: a hierarchical reinforcement learning approach**. arxiv.org, 2013.

CHOWDHURY, M. Z.; BUI, M. T.; JANG, Y. M. Neighbor cell list optimization for femtocell-to-femtocell Handover in dense femtocellular networks. **Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)**, Third International Conference on , v., n., p.241,245, 15-17. 2011.

CHUEH, H.; CHANG, F; KAO, S. A beacon-based handover scanning mechanism with QoS support in WiMAX FemtoCell architecture. **Computer Science & Education (ICCSE)**, 6th International Conference on , v., n., pp.1069-1074, 3-5. 2011.

CLAUSSEN, H. Performance of macro and co-channel femtocells in a hierarchical cell structure. Proc. IEEE 18th Int'l **Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Commun.** 2007.

_____; HO, L. T. W.; SAMUEL, L. G. An overview of the femtocell concept. **Bell Labs Technical Journal**, 13, p.245. 2008.

Copa Transparente – Portal de Acompanhamento de Gastos para a Copa do Mundo de Futebol de 2014 e para os Jogos Olímpicos de 2016. Disponível em <http://www.copatransparente.gov.br/portalcopasobre>. Acessado em: 09 dez. 2013.

CORTÉS, O. A. C. **Desenvolvimento e avaliação de algoritmos numéricos paralelos**. 1999. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação e Matemática Computacional). Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

COSTA, B. A. **Avaliação da tecnologia femtocell como canal de retorno para TV digital**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

COSTA NETO, T. A. J. **Análise de protocolos de roteamento Unicast em redes ad hoc móveis baseada em um modelo realístico de bateria.** 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação), Universidade Federal de Campina Grande. 2011.

DAMNJANOVIC, A.; MONTOJO, J.; YONGBIN WEI; TINGFANG JI; TAO LUO; VAJAPAYAM, M.; TAESANG YOO; OSOK SONG; MALLADI, D. A survey on 3GPP heterogeneous networks. **Wireless Communications, IEEE**, vol.18, no.3, pp.10,21, June 2011.

DEMIRDOGEN, I.; GÜCENÇ, I.; HÜSEYİN A. A Simulation study of performance trade-offs in open access femtocell networks. **IEEE 21st International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops**, 2010.

ERTÜRK M. C., GÜVENC I. AND ARSLAN H. Femtocell gateway scheduling for capacity and fairness improvement in neighboring femtocell networks. **In Proc. IEEE CogCloud Workshop (co-located with IEEE PIMRC 2010)**, Istanbul, Turkey, 2010.

FALLAHI, A. HOSSAIN, E., QoS provisioning in wireless video sensor networks: a dynamic power management framework. **IEEE Wireless Communication**. Volume 14. p. 40 – 49. ISSN: 1536-1284. 2007.

FEMTOCELL. Disponível em: <<http://www.dolcera.com/wiki/index.php?title=Femtocells>>. Acesso em: 20 jun. 2014.

FEMTO-FORUM. Disponível em: <www.femtoforum.org>. Acesso em: 20 out. 2013.

FERREIRA JÚNIOR, H. J. J. **Predição de qualidade de experiência para internet do futuro em arquiteturas heterogêneas de redes sem fio móveis.** 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

FRANCÊS, C. R. L. **Statecharts estocásticos e queuing statecharts – novas abordagens para avaliação de desempenho baseadas em especificação statecharts.** 2001. Tese (Doutorado em Ciência da Computação e Matemática Computacional). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

FERRUS, R.; GELONCH, A.; CASADEVALL, F.; REVES, X.; NAFISI, N. Everest testbed: QoS management evaluation in B3G networks. **2nd International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities**. 2006.

GAGO, A. C. G. **Análise do impacto da utilização de femto-células em LTE.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica e Telecomunicações), Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.

GUEDES, S.; CONCEIÇÃO, V.; NUNO, C.; RODRIGUES, L. **Plataforma de desenvolvimento e simulação de protocolos.** 2005.

GUPTA, M.; JHA, C.; KOC, T.; VANNITHAMBY, R. Energy impact of emerging mobile internet applications on LTE networks: issues and solutions. **IEEE Communications Magazine**. v. 51, Issue 2. 2013. p 90-97.

HAREL, D. Statecharts: a visual formalism for complex systems. **The science of computer programming**. v. 8, n. 3, 1987. p. 231-274.

HARIYANTO, H. et al. Backhaul-aware scheduling for WiMAX femtocell with limited backhaul capacity. **IEEE Region 10 Conference**. v., n., p.1280-1284, 21-24 nov. 2011.

HO, L.T.W.; CLAUSSEN, H. Effects of user-deployed, co-channel femtocells on the call drop probability in a residential scenario. **The 18^o Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Communications**. Atenas, 2007.

HONGYAN, B., CHEN, H., E LINGGE, J. Performance analysis of vertical handover in a UMTS-WLAN integrated network. **Personal, Indoor and Mobile Radio Communications**, PIMRC 2003. 14th IEEE Proceedings on, v.1, 2003. p. 187-191.

HU, L.; GORTON, I. Performance Evaluation for Parallel Systems: A Survey. Sydney, Australia: University of NSW, School of Computer Science and Engeneering, Department of Computers Systems, 1997.

ITU. International Telecommunications Union. **P.800: Methods for subjective determination of transmission quality**. Disponível em:<<http://www.itu.int/rec/T-REC-P.800-199608-I/en>>. Acesso em: 20 jan. 2012.

ITU-T,. E.800: **Denitions of terms related to quality of service**, 09(2008). Disponível em: < <http://www.itu.int/rec/T-REC-E.800-200809-I/en>. >. Acesso: em 10 jan. 2014,

ITU-R Recommendation P.800, Methods for objective and subjective assessment of quality, Technical Report, 1996.

JAIN, R. Quality of experience. **IEEE Multimidia**. v.11, 2004. p. 90-98.

_____. **The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling**. New York: John Wiley, 1991.

JAYASHREE, S.; B. S. MANOJ, S. B. and MURTHY, R. S. C. **On using battery state for medium access control in ad hoc wireless networks**. In ZYGMUNT J. H.; DAS, Samir R.; JAIN R. **Mobicom** . [S.l.]: ACM, 2004. p. 360–373.

JONGERDEN, M. R.; and B.R.H.M. HAVERKORT, B. R. H. M. Which battery model to use? In: **24th UK Performance Engineering Workshop**. n.DTR08-9 in Technical Report Series of the Department of Computing, Imperial College London, p. 76–88. Imperial College London, July 2008.

KLEINROCK, L. **Queueing Systems**. New York: John Wiley & Sons, 1975.

KIM J. Y, e CHO D. H. A joint power and subchannel allocation scheme maximizing system capacity in dense femtocell downlink systems. In **Proc. IEEE Int. Symp. Personal, Indoor, Mobile Radio Commun. (PIMRC)**. Tóquio: [s.n.], 2009.

KONG, P. Optimal probabilistic policy for dynamic resource activation using markov decision process in green wireless networks. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, 28 Feb. 2014. IEEE computer Society Digital Library. IEEE Computer Society.

KOROWAJCZUK, L. **LTE, WiMAX and WLAN network design, optimization and performance analysis**. [S.l.]: Wiley, 2011.

KOVACS, Z. L. **Teoria da probabilidade e processos estocásticos**. [S.l.]: Edição acadêmica. 1996.

LAHIRI, K.; DEY, S.; PANIGRAHI, D. RAGHUNATHAN, A. *Battery-driven system design: a new frontier in low power design*". In: **ASP-DAC'02: Proceedings of the 2002 Asia and South Pacific Design Automation Conference**, pages 261+, Washington, DC, USA, 2002. IEEE Computer Society.

LEE, T. et al. Resource allocation analysis in OFDMA femtocells using Fractional Frequency Reuse. **International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications Workshops**, in IEEE 21st International Symposium. Istanbul. 2010.

LEWIS, H. R.; PAPADIMITRIOU, C. H. **Elements of the Theory of Computation**. 2^a ed. [S.l.]: Prentice Hall, 1997.

LI, Y. et al. Overview of femtocell support in advanced WiMAX systems. **IEEE Communications Magazine**. [S.l.]: [s.n.], 2011.

MALKOWSKI, M.; CLABEN, D. Performance of video telephony services in UMTS using live measurements and network emulation. **Wireless Personal Communications: An International Journal**. v. 46, issue 1, jul. 2008. p. 19-32.

MAQBOOL, M.; LALAM, M.; LESTABLE, T. Comparison of femto cell deployment models for an interference avoidance technique. **Future Network & Mobile Summit (FutureNetw)**. v., n., p.1-9, 15-17. 2011.

MHIRI, F.; REGUIGA, B. S. K.; BOUALLEGUE, R.;PUJOLLE, G. A power management algorithm for green femtocell networks. **The 10th IFIP Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop**, 2011.

NETWORK SIMULATOR - NS-2. Disponível em <<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>>. Acesso: em 16 mar.2014.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY - NIST. Disponível em <<http://www.nist.gov/>>. Acesso: em 10 dez.2013.

NKANSAH-GYEKYE, Y.; AGBINYA, I. The Vertical Handoff Decision Algorithm for Next Generation Wireless Networks, **IEEE Third International Conference on Broadband Communications, Information Technology & Biomedical Applications**, p. 358 – 364, 2007.

PAREIT, D.; LANNOO, B.; MOERMAN, I.; DEMEESTER, P. The History of WiMAX: A Complete Survey of the Evolution in Certification and Standardization for IEEE 802.16 and WiMAX. **Ieee Communications Surveys & Tutorials**. v. 14, n. 4, Fourth Quarter, 2012.

PETERSON, J. L. **Petri nets: an Introduction**. Englewood Cliffs. NJ: Prentice Hall, 1981.

PIDD, M. **Computer simulation and management science**. 4^a ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.

PROJETO DE REDES. Disponível Em: <
http://www.projetoderedes.com.br/artigos/artigo_metricas_qos_em_redes.php > Acesso em:
05 jun. 2014.

PUTERMAN, L. M. **Markov decision processes: discrete stochastic dynamic programming**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1994.

RAHEEM, R.; LASEBAE, A.; LOO, J. Performance Evaluation of LTE network via using Fixed/Mobile Femtocells. **28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops**, 2014.

RAKHMATOV, D.; VRUDHULA, S. **Energy management for battery-powered embedded systems**. ACM Trans. Embed. Comput. Syst., 2(3):277–324, 2003.

_____. An analytical high-level battery model for use in energy management of portable electronic systems. In: **International conference on Computeraided design (ICCAD)**. 2001. p. 488-493.

RANGAN, S.; MADAN, R. Belief propagation methods for intercell interference coordination in femtocell networks. **Selected Areas in Communications**, IEEE Journal on. v.30, n.3, 2012. p.631-640.

SALEM B. A.; REGUIDA B. S. K. Toward green mobility in femtocell networks. **27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops**. 2013.

SANTANA, M, J. et al. Methodologies for performance evaluation of distributed systems: a comparison study. **The Proceedings of the: Summer Computer Simulation Conference, Arlington**. Virginia (USA): [s.n.], 1997. p. 124-28.

SAUSEN, S. P. **Gerenciamento integrado de energia e controle de topologia em redes de sensores sem fio**. 2008. Tese, Universidade Federal de Campina Grande, 2008.

SILVA K. **Uma abordagem para análise do impacto da utilização de femtocells em um cenário LTE - estudo de caso em simulação discreta**. 2014. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Pará, 2014.

SILVA P. D.; JÚNIOR F. J. J.; COELHO S. B. M.; DIAS, L. K. 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**. 2010.

SPOHN, M. A.; SAUSEN, S. P.; J. SOUSA, B. R. J.; PERKUSICH, A., and LIMA, N. M. A. Simulation of wireless sensor networks based on a realistic battery model. In: **Mobile Telephones: Networks, Applications, and Performance**. [S.l.]: Nova Science Publishers, 2008. p.211–229.

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

SUNG, Y.; JEON, N.; YOON, B.; LEE, J.; KIM, S. Femtocell/macrocell interference analysis for mobile Wimax system. **Proc. 5th IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communication Symposium (APWCS 2008)**, v.1, Sendai (Japão), ago. 2008.

TAKAHASHI, A.; HANDS, D.; BARRIAC, V. Standardization activities in the ITU for a QoE assessment of IPTV. **IEEE Communication Magazine**. [S.l.]: [s.n.], 2008.

TAKAHATA, K.; UCHIDA, N.; SHIBATA, Y. QoS control for real time video stream over hybrid network by wired and wireless LANs. **Advanced Information Networking and Applications (AINA)**. p 35 – 41. 2005.

TAHA, A.-E. M. et al. **LTE, LTE-Advanced and WiMAX: Towards IMT-Advanced Networks**. [S.l.]: Wiley, 2012.

TIJMS, H. C. **Stochastic models: an algorithmic approach**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1994.

UEMURA, S.; FUKUMOTO, N.; YAMADA, H.; NAKAMURA, H. QoS/QoE measurement system implemented on cellular phone for NGN. **IEEE Consumer Communications and Networking Conference**. 2008.

União Europeia. Disponível em <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/08/1998>, acessado em: 02 dez. 2013.

VQEG, Video Quality Experts Group. Disponível em <<http://www.its.bldrdoc.gov/vqeg> >. Acesso em 10 de abril de 2014.

WANG, Z.; LU, L.; BOVIC, A. Video quality assessment based on structural distortion measurement. **Signal Processing: Image Communication**. v. 19, n. 2, 2004.

WINKLER, S. **Perceptual video quality metrics: a review**, in Digital Video Image Quality and Perceptual Coding. [S.l.]: CRC Press, 2005.

YUV Video Akiyo. Disponível em <<http://trace.eas.asu.edu/yuv/index.html> >. Acesso em: 05 ago. 2014.

ZAHIR, T. et al. Interference management in femtocells. **IEEE, Communications Surveys and Tutorials**. 2013

ZHANG, J.; ROCHE, G.L. **Femtocells technologies and deployment**. [S.l.]: Wiley, 2010.

ZHENG, H.; WANG, S.; COPELAND, J.; QoS constrained resource allocation for multimedia wireless networks. **IEEE Vehicular Technology Conference**. Volume 2. p 913 – 933. 2000.

ZHENG, K.; WANG, Y.; WANG, W., China Unicom Research Institute. Energy-Efficient Wireless In-Home: The Need For Interference-Controlled Femtocells. **IEEE Wireless Communications**, December 2011.

ZHUANG, Y; ZHAO, S.; ZHU X. A new handover mechanism for femtocell-to-femtocell: Wireless Communications & Signal Processing (WCSP). **International Conference on**, v., n., p.1,4, 25-27. 2012.