



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

JÉSSICA JANILE MONTEIRO DE CASTILHO

AS REDES WLAN SERÃO SUPERADAS? UM ESTUDO DE VIABILIDADE DE  
REDES WLAN EM DENSENETS: UMA ANÁLISE BASEADA EM QOS/QOE.

DM: 29/2015

UFPA /ITEC/PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2015



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

JÉSSICA JANILE MONTEIRO DE CASTILHO

AS REDES WLAN SERÃO SUPERADAS? UM ESTUDO DE VIABILIDADE DE  
REDES WLAN EM DENSENETS: UMA ANÁLISE BASEADA EM QOS/QOE.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Computação Aplicada.

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

2015

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

AS REDES WLAN SERÃO SUPERADAS? UM ESTUDO DE VIABILIDADE DE  
REDES WLAN EM DENSENETS: UMA ANÁLISE BASEADA EM QOS/QOE.

AUTORA: **JÉSSICA JANILE MONTEIRO DE CASTILHO**

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 GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA COM ÊNFASE EM COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA:**

---

**PROF. DR. CARLOS RENATO LISBOA FRANCÊS**  
(ORIENTADOR – PPGEE/UFPA)

---

**PROF. DR<sup>a</sup>. JASMINE PRISCYLA LEITE DE ARAÚJO**  
(CO-ORIENTADORA – MEMBRO EXTERNO FCT/UFPA)

---

**PROF. DR. GERVÁSIO PROTÁSIO DOS SANTOS CAVALCANTE**  
(MEMBRO – PPGEE/UFPA)

---

**PROF. DR. DIEGO LISBOA CARDOSO -**  
(MEMBRO – PPGEE/UFPA)

**VISTO:**

---

**PROF. DR. EVALDO GONÇALVES PELAES**  
(COORDENADOR DO PPGEE/ITEC/UFPA)

Aos meus pais e aos meus irmãos, por acreditarem em minha capacidade e por me apoiar e ajudar em todos os momentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pois graças à fé e a certeza de sua ajuda e direção pude chegar ao fim deste estudo.

Aos meus pais, por seu amor e apoio incondicional, vocês são fontes de forças.

Aos meus irmãos pelo apoio e por sempre acreditarem no meu potencial. Em especial a minha irmã Janize Castilho, por sua parceria ao longo de toda a minha vida. Por me incentivar e ajudar a todo instante.

Ao meu sobrinho, César Castilho, que mesmo com três meses de vida tornou-se fonte de inspiração inesgotável.

As minhas tias (os), primas (os), avô e cunhada, por seu amor, cuidado e incentivo que me são dados todos os dias.

Ao meu orientador, Renato Francês, por ter me acolhido como orientada desde o meu TCC, por ter acreditado no meu potencial, por sempre ter sido paciente e benevolente. Muito obrigada, professor, pela oportunidade de trabalhar com o senhor, e por todos os ensinamentos ao longo desses anos. O senhor é um exemplo a ser seguido.

Agradeço a querida professora, Jasmine Araújo, por toda a sua dedicação e paciência, pois sua ajuda, orientação e parceria foram muito valiosas e primordiais ao longo do desenvolvimento deste estudo. Palavras não conseguem expressar minha gratidão.

Ao meu amigo, Marcelo Moraes, por sua parceria e paciência. Por me incentivar e ajudar a não desistir. Obrigada por todo o conhecimento que me foi transmitido, de maneira tão paciente, ao longo de todos esses anos. Obrigada pelas horas dedicadas a ajudar a encontrar soluções para os problemas enfrentados nessa dissertação. Obrigada pela amizade.

A todos os meus amigos pelo incentivo e amizade. Em especial ao Rodrigo Guimarães, por ter vivido comigo toda a trajetória da graduação e mestrado, compartilhando os momentos de alegrias e tristezas. Obrigada pela amizade e parceria de sempre.

Á todos os integrantes do laboratório LPRAD, pela acolhida. Em especial a Ketyllen Silva, pela ajuda e parceria ao longo dessa dissertação. Obrigada, pela experiência, conhecimento transmitido e pela paciência.

Ao PPGEE e UFPA, pela oportunidade dada para a realização dessa dissertação e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

*“Feliz aquele que transfere o que sabe e  
aprende o que ensina.”*

(Coca Carolina)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
1.1	MOTIVAÇÃO.....	19
1.2	OBJETIVO.....	20
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	20
<b>2</b>	<b>REDES SEM FIO .....</b>	<b>22</b>
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	22
2.2	PADRÃO 802.11.....	22
2.2.1	<i>Arquitetura</i> .....	23
2.2.2	<i>Modos de Operação</i> .....	23
2.2.3	<i>Camada Física e MAC da WLAN</i> .....	24
2.2.4	<i>Padrões IEEE 802.11</i> .....	25
2.2.4.1	Padrão IEEE 802.11b.....	25
2.2.4.2	Padrão IEEE 802.11a.....	26
2.2.4.3	Padrão IEEE 802.11g.....	26
2.2.4.4	Padrão 802.11n.....	27
2.2.5	<i>Roaming (handover)</i> .....	27
2.3	LTE.....	28
2.3.1	<i>Evolução das Redes Móveis</i> .....	28
2.3.2	<i>Arquitetura LTE</i> .....	29
2.4	HANDOVER .....	31
2.4.1	<i>Processos de Handover</i> .....	32
2.5	4G E LTE-ADVANCED.....	33
2.6	FEMTOCELL /ARQUITETURA.....	34
2.6.1	<i>Características</i> .....	35
2.6.1.1	<i>Alocação de Canais de Frequências</i> .....	35
2.6.1.2	<i>Interferência</i> .....	35
2.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	37
<b>3</b>	<b>TRABALHOS CORRELATOS .....</b>	<b>38</b>
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	38
3.2	TRABALHOS RELACIONADOS .....	38
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	42
<b>4</b>	<b>AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO.....</b>	<b>43</b>
4.1	INTRODUÇÃO.....	43
4.2	PASSOS PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO.....	43
4.3	TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO.....	44
4.3.1	<i>Modelagem</i> .....	44
4.3.1.1	<i>Técnicas Baseadas em Processos</i> .....	45
4.3.1.2	<i>Técnicas Baseadas em Estados</i> .....	45



4.4	SOLUÇÕES PARA O MODELO.....	46
4.4.1	<i>Modelo Analítico</i> .....	46
4.4.2	<i>Modelo de Simulação</i> .....	47
4.4.2.1	Tipos de Simulação.....	48
4.4.2.2	Simulação Discreta baseada em Eventos.....	49
4.4.3	<i>Simuladores</i> .....	49
4.4.4	<i>Solução Preferencial</i> .....	49
4.4.5	<i>Aferição</i> .....	50
4.4.5.1	Protótipo.....	50
4.4.5.2	Benchmarks.....	50
4.4.5.3	Coleta de dados.....	50
4.4.6	<i>Solução preferencial</i> .....	51
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASOS.....</b>	<b>52</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	52
5.2	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	52
5.3	SIMULADOR OPNET MODELER.....	53
5.4	METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO PROPOSTA.....	54
5.5	CENÁRIOS DAS REDES.....	55
5.6	CONFIGURAÇÕES DO FLUXO.....	57
5.7	DEFINIÇÃO DE MOBILIDADE.....	58
5.8	RESULTADOS.....	58
5.9	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>72</b>
6.1	CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO.....	73
6.2	TRABALHOS FUTUROS.....	74
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>75</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>1G</b>	Primeira geração de telefonia móvel
<b>2G</b>	Segunda geração de telefonia móvel
<b>3G</b>	Terceira geração de telefonia móvel
<b>3GPP</b>	<i>Third Generation Partnership Project</i>
<b>4G</b>	Quarta geração de telefonia móvel
<b>AP</b>	<i>Access Point</i>
<b>BSS</b>	<i>Basic Service Set</i>
<b>CAPEX</b>	<i>Capital Expenditure</i>
<b>CDMA</b>	<i>Code Division Multiple Access</i>
<b>CFD</b>	<i>Computational Fluid Dynamic</i>
<b>DFD</b>	<i>Data Flow Diagram</i>
<b>DFWMAC</b>	<i>Distributed Foundation Wireless MAC</i>
<b>DNS</b>	<i>Domain Name System</i>
<b>DS</b>	<i>Distribution System</i>
<b>DSSS</b>	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
<b>DSL</b>	<i>Digital Subscriber Loop</i>
<b>DTN</b>	<i>Delay Tolerant Networking</i>
<b>ENodeB</b>	<i>Enhanced NodeB</i>
<b>EPC</b>	<i>Evolved Packet Core</i>
<b>ESS</b>	<i>Extended Service Set</i>
<b>EUTRAN</b>	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access</i>

<b>FHSS</b>	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
<b>GSM</b>	<i>Global System for Mobile Communications</i>
<b>GUI</b>	<i>Graphical User Interface</i>
<b>HeNB</b>	<i>Home Enhanced NodeB</i>
<b>HSS</b>	<i>Home Subscriber Server</i>
<b>HMS</b>	<i>HNB Management System</i>
<b>HNB</b>	<i>Home NodeB</i>
<b>HSPA</b>	<i>High Speed Packet Access</i>
<b>HWMP</b>	<i>Hybrid Wireless Mesh Protocol</i>
<b>IBSS</b>	<i>Independent Basic Service Set</i>
<b>IEEE</b>	<i>The Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<b>IMS</b>	<i>Internet Media Services</i>
<b>IP</b>	<i>Internet Protocol</i>
<b>IPSec</b>	<i>Internet Protocol Security</i>
<b>KB/s</b>	<i>Kilobyte por segundo</i>
<b>LAN</b>	<i>Local Area Network</i>
<b>LAPS</b>	Laboratório de Processamento de Sinais
<b>LEA</b>	Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado
<b>LCT</b>	Laboratório de Computação e telecomunicações
<b>LLC</b>	<i>Logical Link Controller</i>
<b>LPRAD</b>	Laboratório de Redes de Alto desempenho
<b>LTE</b>	<i>Long Term Evolution</i>
<b>M2M</b>	<i>Machine to Machine</i>

<b>MADNet</b>	<i>Metropolitan Advanced Delivery Network</i>
<b>Mbps</b>	<i>Mega bits por segundo</i>
<b>MIMO</b>	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
<b>MHz</b>	<i>Mega Hertz</i>
<b>MME</b>	<i>Mobility Management Entity</i>
<b>MMS</b>	<i>Multimedia Messaging Service</i>
<b>MOS</b>	<i>Mean Opinion Score.</i>
<b>Ns</b>	<i>Network Simulator</i>
<b>NeNBs</b>	<i>Neighboring eNodeB</i>
<b>OFDMA</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
<b>OSI</b>	<i>Open Systems Interconnection</i>
<b>OPEX</b>	<i>Operating Expenditure</i>
<b>PCRF</b>	<i>Policy and Charging Rule Function</i>
<b>P-GW</b>	<i>Packet Data Network Gateway</i>
<b>PSNs</b>	<i>Pocket Switched Networks</i>
<b>PSNR</b>	<i>Peak Signal to Noise Ratio</i>
<b>QoE</b>	<i>Quality of Experience</i>
<b>QoS</b>	<i>Quality of Service</i>
<b>RNC</b>	<i>Radio Network Controller</i>
<b>RSRP</b>	<i>Reference Signal Received Power</i>
<b>SAE</b>	<i>System Architecture Evolution</i>
<b>SeGW</b>	<i>Security Gateway</i>
<b>SeNB</b>	<i>Serving eNodeB</i>

<b>S-GW</b>	<i>Serving Gateway</i>
<b>SMS</b>	<i>Short Message Service</i>
<b>SSF</b>	<i>Sega Saturn emulator</i>
<b>TeNB</b>	<i>Target eNodeB</i>
<b>TTT</b>	<i>Time To Trigger</i>
<b>UIT</b>	União Internacional de Telecomunicações
<b>UMTS</b>	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
<b>VOIP</b>	<i>Voice over Internet Protocol</i>
<b>WCDMA</b>	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
<b>WiFi</b>	<i>Wireless Fidelity</i>
<b>WLAN</b>	<i>Wireless Local Area Network</i>
<b>WiMAX</b>	<i>Worldwide Interoperability for Microwave</i>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Previsão de crescimento do tráfego mundial de dados móveis [9]	18
Figura 2	Previsão das Redes Wi-Fi e Móveis em 2015 [12]	19
Figura 3	Redes sem fio infraestruturada [22]	23
Figura 4	Ad-Hoc [25]	24
Figura 5	Camadas do Padrão IEEE 802.11 [26]	25
Figura 6	Pilha de Protocolos 802.11 [26]	25
Figura 7	Arquitetura UMTS e LTE [33]	29
Figura 8	Arquitetura redes com <i>Femtocell</i> [40]	34
Figura 9	Interferência <i>Femtocell – Femtocell</i> [46]	36
Figura 10	Interferência <i>Femtocell - macrocell</i> [46]	37
Figura 11	Técnicas de avaliação de desempenho	44
Figura 12	Representação de processos competindo por um único processador. [58]	45
Figura 13	Representação de processos concorrendo ao um único processador. [58]	46
Figura 14	Representação de processos concorrendo ao um único processador. [58]	46
Figura 15	Solução preferencial [58].	49
Figura 16	Solução Preferencial [58].	51
Figura 17	Topologia da rede WLAN	55
Figura 18	Topologia da rede <i>Femtocell</i>	55
Figura 19	Cenário WLAN OPNET	56
Figura 20	Cenário Femtocell OPNET	57
Figura 21	Tráfego Enviado - Videoconferência	59
Figura 22	Tráfego Recebido - Videoconferência	60
Figura 23	Atraso fim-a-fim Videoconferência	60
Figura 24	Tráfego Enviado-VoIP	61
Figura 25	Tráfego Recebido - VoIP	62
Figura 26	Atraso Fim-a-Fim VoIP	62
Figura 27	MOS - VoIP	63
Figura 28	<i>Jitter</i> VoIP	64
Figura 29	Tráfego Enviado Usuário Videoconferência	65
Figura 30	Tráfego Recebido Usuário Videoconferência	65
Figura 31	Atraso Fim- a- Fim Usuário Videoconferência	66
Figura 32	Tráfego Enviado Usuário VoIP	66
Figura 33	Tráfego Recebido Usuário VoIP	67
Figura 34	Delay fim-a-fim Usuário VoIP	68
Figura 35	<i>Jitter</i> Usuário VoIP	68
Figura 36	MOS Usuário VoIP	69
Figura 37	Pacotes Perdidos Usuário VoIP	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Características das Principais Tecnologias Celulares [9] .....	31
Tabela 2 – Configuração rede WLAN Interface AP [62][63].....	56
Tabela 3 – Configuração rede WLAN Interface Backbone [64][65] .....	56
Tabela 4 – Configuração rede <i>Femtocell</i> adaptado [61][9].....	57
Tabela 5 – Configuração Aplicação VoIP .....	58
Tabela 6 – Configuração Aplicação Videoconferência .....	58

## RESUMO

A proliferação dos dispositivos móveis como smartphones e tablets somados a mudança do perfil do usuário fazem com que o volume de tráfego de dados móveis cresça de forma exponencial. O que leva a uma sobrecarga da infraestrutura da rede responsável pelo escoamento desse tráfego. A fim de amenizar ou até mesmo solucionar este problema algumas possibilidades estão sendo apresentadas, uma delas é o descarregamento dos tráfegos das redes celulares. Para isso duas tecnologias tem tido maior relevância: *Femtocell* e WLAN. Porém, o uso de *Femtocell* tem sido a panaceia. Todavia tem-se a alternativa das redes WLAN, a qual possui um legado de infraestrutura muito grande. Neste sentido, esta dissertação propõe um estudo comparativo, através de simulação discreta, objetivando analisar o desempenho das duas redes.

**PALAVRAS-CHAVE** : *Femtocell* , WLAN, Desempenho, Simulação.



## **ABSTRACT**

The proliferation of mobile devices like smartphones and tablets and the changes of user profile caused the exponentially growth of mobile data traffic. Which leads to an overload of network infrastructure responsible for disposing of this traffic. In order to mitigate or even solve this problem some possibility are presented, one of which is the offloading of traffic cellular networks. For this, two technologies have had greater relevance: Femtocell and WLAN. However, the use of Femtocell has been considered panacea. However there is the alternative of WLAN networks, which has a very large legacy infrastructure. In this sense, this work proposes a comparative study through discrete simulation, aiming to analyze the performance of our networks.

**KEY-WORDS:** Femtocell, WLAN, Performance, Simulation.

## 1 INTRODUÇÃO

O número de dispositivos móveis tem aumentado de forma exponencial. A Cisco fez um estudo o qual prevê que até 2017 haverá 5,2 bilhões de usuários móveis (em comparação a 4,3 bilhões em 2012) [1].

A União Internacional de Telecomunicações (UIT) constatou que, até o fim desta década, estarão em funcionamento mais de 55 bilhões de dispositivos de comunicação móvel, sendo 12 bilhões deste *smartphones* e *tablets* [2].

Já a pesquisa divulgada em abril de 2015 pela ComScore, em parceria com a IMS (*Internet Media Services*) apontou que mais de 9 entre 10 pessoas, *online*, na América Latina, possuem ou usam um dispositivo móvel com regularidade.

Em outro estudo a Cisco prevê que entre 2013 e 2018, o tráfego global de dados móveis irá superar em três vezes o tráfego global de dados fixos [3]. Observando esses dados, estaríamos no que muitos chamam de “década da mobilidade” [4].

Todos esses dispositivos utilizam comunicação sem fio para acessar a internet. Dentre as redes sem fio mais utilizadas estão as que usam o padrão do *The Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) 802.11, ou ainda, *Wireless Fidelity* (Wi-Fi) e as redes móveis.

Dentro das redes móveis, muitas operadoras móveis globais estão empregando tecnologias 4G (Quarta Geração) para atender à demanda de usuários consumidores e empresas por serviços sem fio. Em muitos mercados emergentes, operadoras estão criando novas redes móveis com soluções 4G. Em mercados maduros, as operadoras estão complementando ou substituindo redes legadas (2G – Segunda Geração de Telefonia Móvel/3G- Terceira Geração de Telefonia Móvel) por tecnologias 4G.

O estudo da Cisco projeta o crescimento e o impacto do 4G: Até 2017, conexões 4G responderão por 45% (5 exabytes/mês) do tráfego total de dados móveis. O tráfego 4G crescerá 40 vezes de 2012 a 2017, uma taxa composta de crescimento anual de 109% [1].

Dentre as tecnologias móveis, pode-se destacar o *Long Term Evolution* (LTE) que é considerado um dos mais importantes sistemas celulares que tem sido invocados pela *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) no *Release 8*. Tem por objetivo fornecer maiores taxas de dados para futuras aplicações móveis [5].

LTE adota *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) como a técnica de base para a partilha de recursos entre vários usuários. O 3GPP ampliou ainda mais a proposta original do LTE, que é conhecida como *LTE-Advanced*. Esta proposta tem como

objetivo atingir taxas de dados de até 1 Gbps e 500 Mbps no *downlink* e *uplink*, respectivamente.

Apesar do fato de que o LTE prometer alta taxa de dados para atender a essa demanda, o problema do congestionamento de tráfego de rede será inevitável devido à limitação do espectro de frequências. A reutilização de frequência pode ser a técnica mais promissora para aumentar a capacidade total de uma célula.

Além disso, se sabe que um dos problemas das redes móveis está na sua ineficiente cobertura *indoor*. Em ambientes *indoor*, a qualidade do canal entre a estação base celular e o nó móvel podem ser prejudicados por paredes e obstáculos. A perda de percurso pode ficar em torno de 15-20 dB [6].

Os dispositivos móveis podem até mesmo perder sua conectividade com a Internet devido a esta grande perda de percurso. Isso faz com que novas soluções e tecnologias sejam criadas para suprir essa necessidade *indoor*. Já que mais de 60% do tráfego de voz e 90% do tráfego de dados são gerados nesses ambientes [7].

E em ambientes assim a comunicação sem fio requer mais recursos, como largura de banda e potência de transmissão, para que se consiga assegurar a qualidade do serviço exigida pelos clientes.

As tecnologias mais promissoras são WLAN (*Wireless Local Area Network*) e *Femtocell* em redes LTE. Esta última vem sendo considerada pelo 3GPP como potencial extensão de LTE-Advanced para expandir a cobertura e capacidade [8].

Apesar do crescimento das redes móveis, a WLAN ainda tem um papel importante. A pesquisa feita pela ComScore em parceria com a IMS, revelou que quanto à forma de acesso a Internet, segundo a pesquisa, que no Brasil 81% dos usuários de *smartphones* recorrem ao uso das redes Wi-Fi, e 19% utilizam a rede 4G [4]. O que prova que as redes WLAN ainda são muito utilizadas atualmente.

Em adição a quantidade de dispositivos móveis crescentes, o perfil do usuário vem se modificando, utilizando aplicações que exigem cada vez maior capacidade de transmissão, os tráfegos *triple play*. O que representa um maior tráfego de dados na rede. A Figura 1 mostra a previsão do crescimento do tráfego de dados móveis nos próximos anos.

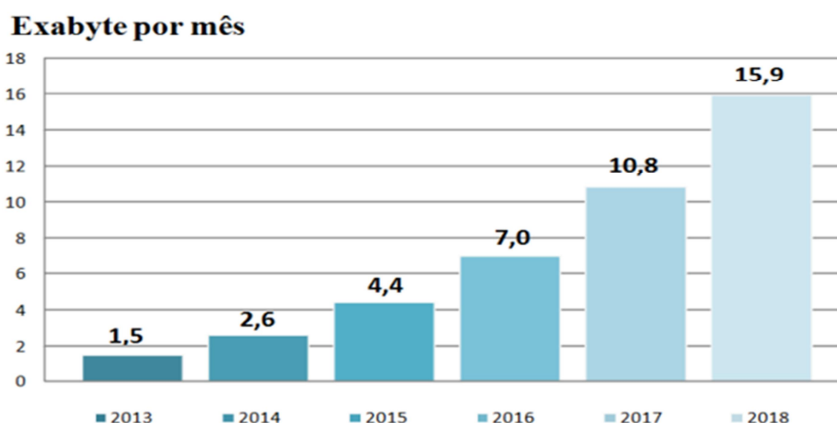


Figura 1 Previsão de crescimento do tráfego mundial de dados móveis [9]

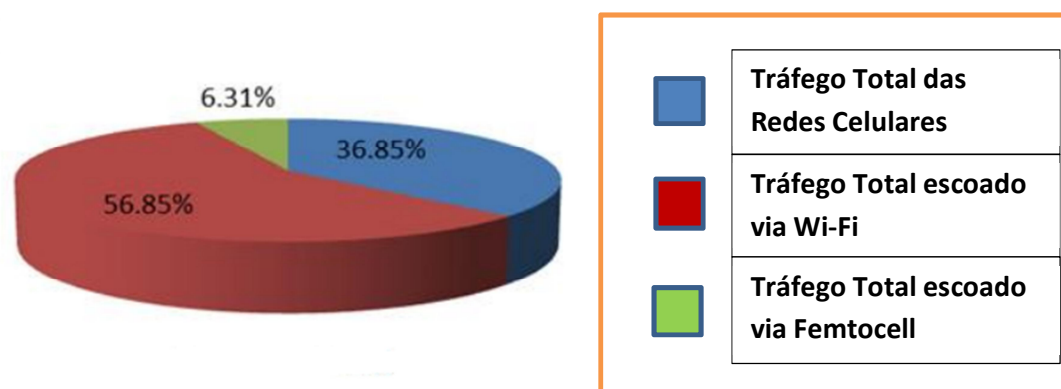
Dada a mudança do perfil dos usuários, os serviços multimídia têm sido cada vez mais utilizados. Um estudo feito pela Cisco prevê que em 2018, o tráfego global de vídeo móvel representará 69% de todo o tráfego global de dados móveis (a partir dos 53% calculados em 2013) [3]. Esses serviços geram tráfegos intensos na rede, que demandam por altas taxas de transmissão e são sensíveis ao atraso, variação de atraso e perdas de pacotes.

Essa crescente demanda por multimídia sem fio *indoor* e as tendências em curso de convergência móvel, estão pavimentando o caminho para a implantação de toda a indústria de *Femtocells*. Essas *Femtocells* podem ser de acesso aberto ou acesso fechado. Acesso aberto permite que qualquer usuário arbitrário use a *Femtocell*, já no acesso fechado restringe-se aos usuários previamente cadastrados e dentro da região de alcance da *Femtocell* [10].

Por outro lado, as redes locais sem fio (WLANs) foram desenvolvidas como uma extensão das LANs (*Local Area Network*) terrestres, para fornecer conectividade de rede com mobilidade reduzida. Embora as redes celulares consistam em um *backbone* terrestre dedicado, WLANs, por outro lado, geralmente estão ligadas diretamente às redes IP (*Internet Protocol*) através *Digital Subscriber Loop* (DSL) ou rede *backbone Ethernet* [11].

Pesquisas como da ComScore, em parceria com a IMS, demonstrou que as redes Wi-Fi são muito utilizadas. Dados como os demonstrados em [12] que preveem que em 2015 as redes Wi-Fi serão as que mais farão o descarregamento de tráfego (*data traffic offloaded*), sendo 56 %, enquanto que as *Femtocell* 6%, como pode ser visto na Figura 2. Previsão como a da Cisco que em 2018 será maior a quantidade de tráfego de dados móveis em redes WiFi a partir de dispositivos móveis conectados (17,3 Exabytes mensais) do que o tráfego que permanecerá nas redes móveis (15,9 Exabytes mensais) [3].

Todas essas pesquisas e estudos provam o quão às redes Wi-Fi ainda são e podem ser utilizadas.



**Figura 2** Previsão das Redes Wi-Fi e Móveis em 2015 [12]

Além disso, há um legado muito grande de infraestrutura, no Brasil estima-se que as operadoras tenham mais de 1.025.159 pontos de acesso Wi-Fi no Brasil [13].

A *iPass Mobile Network*, empresa fornecedora de Wi-Fi comercial no mundo, fez um levantamento e apontou que o número de *hotspots* Wi-Fi no Brasil cresceu 189% na passagem de 2013 para 2014. Com isso, o mesmo ocupa a oitava posição no ranking de países com maior disponibilidade de Wi-Fi.

A mesma *iPass* mostra nesse levantamento que o número total de *hotspots* no mundo em 2013 é de 98,534,045. E estima que em 2018 haja cerca de um *hotspot* Wi-Fi para cada vinte pessoas na terra. A própria tem 20 milhões de *hotspots* Wi-Fi espalhados em 120 países [14].

A integração entre LTE e *Femtocell* parece promissora. Mas, até que ponto? Apesar da simplicidade conceitual das *Femtocells*, existem ainda aspectos cruciais em questionamento, para se tornarem uma realidade, dentre os quais se ressalta: interferência, gerência de *handover*, segurança, escalabilidade, controle de acesso, entre outras [15].

## 1.1 *Motivação*

O contínuo aumento dos dispositivos móveis acarreta a necessidade de redes que suportem um volume maior de dados e suporte a usuários multimídia.

Uma única abordagem não resolverá o desafio causado pelo crescimento exponencial do tráfego de rede. Uma das soluções mais promissoras para lidar com a explosão do tráfego de dados móveis é o descarregamento destes, que se refere à utilização de tecnologias de rede

complementares e técnicas inovadoras para descarregar o tráfego de dados de redes celulares, e assim, aliviar o congestionamento [16].

As dúvidas sobre a viabilidade e relevância do uso de WLAN para auxiliar as redes celulares para descarregamento de tráfego têm sido pesquisadas e naturalmente, incertezas têm surgido.

Por outro lado, *Femtocell* que é estruturalmente semelhante a redes celulares em termos de banda de frequência e camada PHY é a panaceia do momento, o que conduz a uma crescente sensação de que o uso de WLAN está diminuindo e provavelmente, ele não pode ser mais usado e será substituído por *Femtocells*. Mas a questão é: isso é verdade?

Além do mais já foi feito um investimento grande na infraestrutura WLAN em todo o mundo. Somente a operadora Oi no Brasil, tem mais de 1 milhão de pontos de acesso Wi-Fi espalhados pelo Brasil [17]. Seria realmente vantajosa a decrescentes utilização das WLAN, e valeria a pena aumentar CAPEX (*Capital Expenditure*) e OPEX (*Operating Expenditure*) das operadoras com as *Femtocell*?

## **1.2 Objetivo**

Esta dissertação irá analisar o desempenho das redes *Femtocell* e WLAN, colocando as duas redes sobre as mesmas condições: Mesmo número de usuários, mesma aplicação e mesma quantidade de células. Tendo como objetivo verificar qual das duas tecnologias teria um melhor desempenho para um possível descarregamento de tráfego.

Para isso várias métricas de desempenho de rede são apresentadas por intermédio de simulações. Para tanto, realiza-se uma adaptação no módulo LTE no simulador OPNET *Modeler*, de tal forma que as características de uma *Femtocell* possam ser representadas.

## **1.3 Organização da Dissertação**

Este documento está dividido em 5 capítulos. O capítulo 2 irá mostrar uma revisão bibliográfica das redes sem fio: o padrão do IEEE 802.11; uma breve abordagem dos pontos principais do LTE juntamente com a *Femtocell*.

No capítulo 3 apresenta-se os trabalhos relacionados, os quais contribuíram na elaboração desta dissertação.

No capítulo 4 apresenta-se as técnicas de modelagem para avaliação de desempenho, explicando de forma mais detalhada as etapas e principais técnicas de especificação e solução do modelo.

No capítulo 5 é exposto a metodologia proposta e o estudo de caso realizado, detalhando o ambiente de simulação, no qual se demonstram os parâmetros e configurações utilizados, assim como os resultados obtidos.

No Capítulo 6 apresenta-se as considerações finais sobre os temas abordados na proposta do trabalho, apontando os possíveis trabalhos futuros.

## 2 REDES SEM FIO

### 2.1 *Considerações Iniciais*

O aumento na popularidade de redes sem fio tem levado ao aumento da demanda de capacidade. Um número maior de usuários prefere a tecnologia sem fio, em comparação com os serviços com fio. O acesso sem fio consiste basicamente em duas tecnologias principais, as redes celulares sem fio, as quais asseguram serviços de voz e dados para usuários com alta mobilidade, e as redes locais sem fio (WLANs), que proporcionam maiores taxas de dados para usuários com mobilidade comparativamente restrita [18].

Neste capítulo faz-se uma descrição destas tecnologias as quais serão estudadas ao longo do trabalho. Inicia-se com uma abordagem sobre as redes sem fio do padrão 802.11, explicando sobre seu funcionamento, assim como suas principais características. Em seguida, faz-se uma breve descrição da evolução das redes móveis para posterior abordagem do sistema de comunicações móveis LTE, assinalando suas principais características e as alterações dos elementos que compõem esta nova rede. Por fim, apresenta-se a arquitetura e os principais conceitos de *Femtocell*.

### 2.2 *Padrão 802.11*

O padrão 802.11 vem se apresentando como uma boa alternativa às redes cabeadas, onde não for possível ou conveniente utilizá-las, como em prédios históricos, teatros, chão de fábrica de indústrias entre outros [19].

Uma rede sem fio (*Wireless*) é tipicamente uma extensão de uma rede local (LAN) convencional com fio, criando-se o conceito de rede local sem fio (WLAN). Uma WLAN converte pacotes de dados em onda de rádio ou infravermelho. E os envia para outros dispositivos sem fio, ou para um ponto de acesso que serve como uma conexão para uma LAN com fio [20].

O IEEE constituiu um grupo chamado de *Wireless Local-Area Networks Standard Working Group*, com a finalidade de criar padrões para redes sem fio, definindo um nível físico para redes onde as transmissões são realizadas na frequência de rádio ou infravermelho, e um protocolo de controle de acesso ao meio, o DFWMAC (*Distributed Foundation Wireless MAC*). Esse padrão é denominado de Projeto IEEE 802.11[20].



### 2.2.1 Arquitetura

A rede se organiza em um ou mais grupos de estações associadas a um AP (*Access Point*), os quais são denominados BSS (*Basic Service Set*). Uma estação dentro de um BSS se comunica diretamente e somente com o AP. Dois ou mais BSS podem ser interligados por um sistema de distribuição (DS - *Distribution System*), formando um ESS (*Extended Service Set*). O sistema de distribuição pode ser formado pela rede cabeada *Ethernet* ou pela própria rede sem-fio [21]. A Figura 3 mostra o esquema.

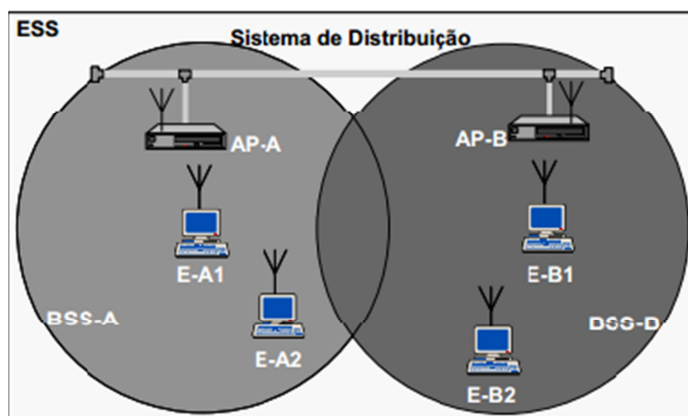


Figura 3 Redes sem fio infraestruturada [22]

Originalmente o primeiro padrão de rede sem fio foi o IEEE 802.11 *legacy*, o qual possuía velocidade máxima de transmissão de 2 Mbps, trabalhando na banda de 2.4GHz. Este padrão evoluiu com o tempo, criando-se novas extensões, onde foram incluídas novas características operacionais e técnicas [23]. No tópico 2.2.4 serão vistas as principais extensões.

### 2.2.2 Modos de Operação

As redes IEEE 802.11 podem se organizar de duas formas: redes infraestruturadas e Ad-Hoc.

As infraestruturadas já foram citadas neste trabalho e mostrou-se que nesta organização todas as comunicações são intermediadas pelos APs. As redes Ad-Hoc também são constituídas por estações que utilizam comunicação sem fio. A principal característica dessas redes é a ausência de infraestrutura, como pontos de acesso ou estações-base, existentes em outras redes locais sem fio.

Portanto, uma estação se comunica com outra estando na mesma área de alcance. Na ausência de uma infraestrutura, os próprios hospedeiros devem prover serviços como roteamento, atribuição de endereço e tradução de endereços semelhantes ao DNS (*Domain Name System*) [24].

Este tipo de rede é utilizado principalmente em situações em que não se justifica o custo da instalação de rede física, em locais de difícil acesso, em caso de desastres naturais (como terremotos, furacões, tsunamis entre outros) ou guerra.

IBSS (*Independent Basic Service Set*) é um conjunto de estações sem fio que se comunicam através da comunicação Ad-Hoc. Como ilustra a Figura 4.

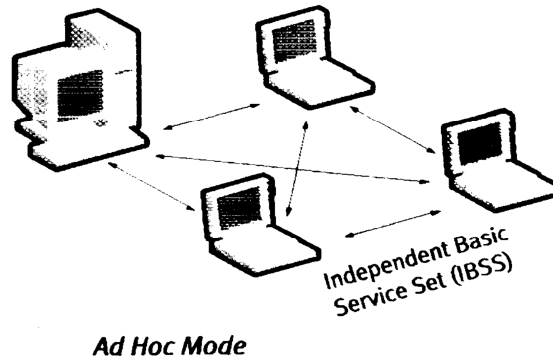


Figura 4 Ad-Hoc [25]

### 2.2.3 Camada Física e MAC da WLAN

O grupo IEEE 802 desenvolve e mantém normas e práticas recomendadas para redes locais LAN. As especificações IEEE 802 focam nas duas últimas camadas do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*). A Camada Física (PHY) que lida com os detalhes da transmissão e recepção e a camada MAC que determina o modo de acesso ao meio e como enviar informação.

Dado o interesse crescente por redes sem fio e aos novos desafios que essa rede traria, o IEEE criou um grupo para definição de um padrão para conectividade sem fio, o qual foi denominado IEEE 802.11. Esta é a norma original e a base de outros protocolos na faixa de frequência 2,4GHz.

O padrão definiu as especificações das camadas PHY e MAC. Esta última é comum as normas que o IEEE desenvolveu para as redes locais sem fio, tanto na banda dos 2,4 GHz quanto na banda dos 5 GHz. A camada LLC (*Logical Link Control*) não faz parte do padrão IEEE 802.11, é a mesma que a LLC da *Ethernet*. A Figura 5 a seguir ilustra as camadas do padrão IEEE 802.11.

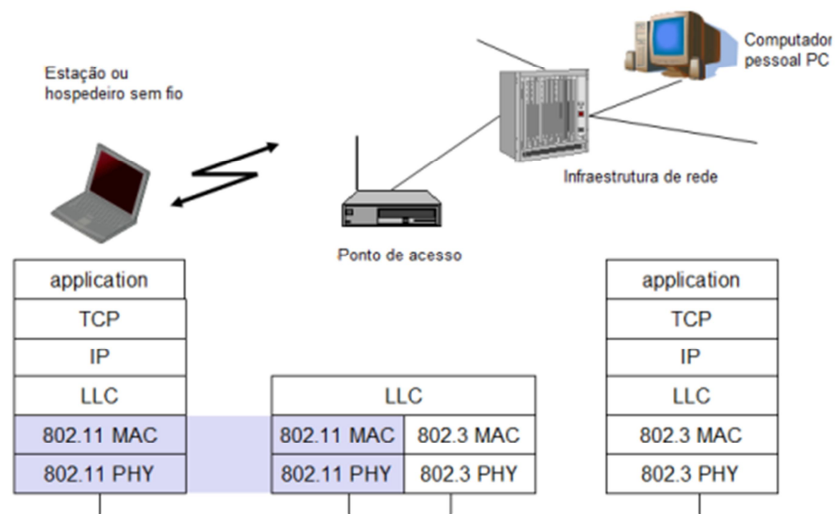


Figura 5 Camadas do Padrão IEEE 802.11 [26]

A camada PHY em qualquer tecnologia de transmissão por rádio define qual a modulação e quais as características do sinal para a transmissão dos dados. O mesmo se verifica neste caso, destinando-se a controlar a transmissão dos dados para as estações podendo usar DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*), OFDM ou infravermelho. A Figura 6 a seguir, ilustra a pilha de protocolos 802.11.

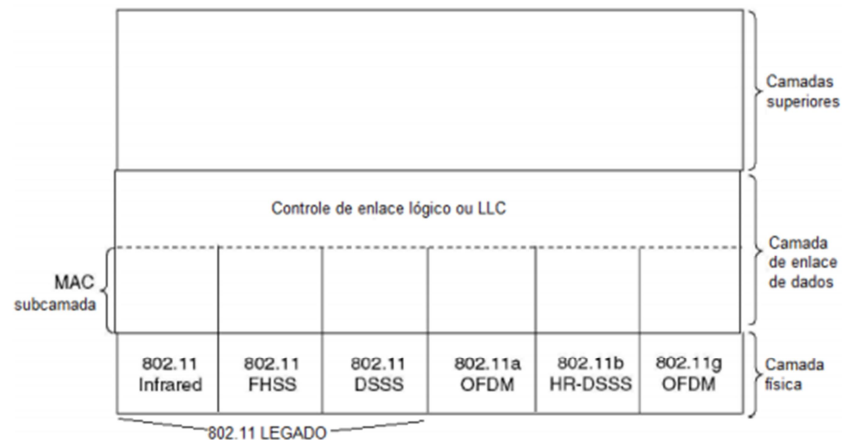


Figura 6 Pilha de Protocolos 802.11 [26]

#### 2.2.4 Padrões IEEE 802.11

##### 2.2.4.1 Padrão IEEE 802.11b

Publicado em 1999, foi o primeiro padrão *Wireless* utilizado em grande escala, marcando a popularização da tecnologia, pois permitia que placas de diferentes fabricantes se

tornassem compatíveis e os custos diminuíssem. Assim como o 802.11 *legacy*, o 802.11b opera na faixa 2,4GHz [27].

As faixas de velocidade admitidas por esse padrão são de 1, 2, 5 e 11 Mbps, operando entre 2,4 e 2,485 GHz; dentro dessa faixa de 85 MHz, o padrão define 11 canais que se sobrepõem parcialmente, a não ser que estejam separados por quatro ou mais canais. O padrão 802.11b permite um número máximo de 32 clientes conectados e possui padrões de interoperabilidade bastante semelhantes a redes *Ethernet* [23].

#### **2.2.4.2 Padrão IEEE 802.11a**

O padrão 802.11a utiliza uma faixa de frequência mais alta que o padrão anterior, 5GHz, e oferece velocidade teórica de 54 Mbps, superior ao padrão 802.11b, apesar de publicado também em 1999. No entanto, devido utilizar uma faixa de frequência maior, acaba atingindo distâncias menores, cerca da metade da distância atingida por uma placa 802.11b, usando o mesmo tipo de antena [27].

Este padrão oferece maior número de clientes conectados, podendo chegar a até 64. Houve também um aumento do tamanho da chave de criptografia, o que proporciona uma maior segurança, comparado ao padrão “b”.

A faixa de 5GHz é considerada mais limpa, devido o baixo volume de dispositivos que operam nesta faixa, logo também é menos suscetível a interferências. No entanto, a compatibilidade com este tipo de rede é incomum nos equipamentos do mercado, tornando seu uso uma opção pouco provável [28].

#### **2.2.4.3 Padrão IEEE 802.11g**

O padrão 802.11g opera na mesma faixa de frequência do padrão “b”, 2,4 GHz, com isso há compatibilidade entre os padrões. A velocidade neste padrão é maior do que no “b”, podendo chegar a 54 Mbps.

Na prática, podem-se atingir velocidades em torno de 3,4 Mbps, divergindo do que os 54 Mbps sugerem. Isso acontece porque as redes *Wireless* sofrem interferência e diversos efeitos durante sua propagação logo, para que os dados sejam transmitidos de forma confiável, é necessário incluir um pesado protocolo de transmissão e correção de erros, o que acarreta numa baixa porcentagem de bits “úteis” transmitidos [28].

Além disso, conforme a distância, as placas deste padrão reduzem a velocidade de transmissão como alternativa para manter a estabilidade do sinal. Na rede 802.11g, a taxa cai

sucessivamente de 54MB para 48, 36, 24, 18, 12, 11, 9, 6, 5.5, 2 ou 1 MB, até que o sinal se perca completamente [27].

#### **2.2.4.4 Padrão 802.11n**

O padrão 802.11n trabalha na faixa de frequência de 2,4 GHz e 5 GHz, compatível com o 802.11b, 802.11g e teoricamente com o 802.11a, resolvendo o problema da compatibilidade entre padrões, proporcionando comunicação entre adaptadores de rede de diferentes fabricantes [29].

O principal foco do padrão 802.11n é o aumento da velocidade, que varia entre 100 a 500 Mbps. Em relação aos padrões anteriores há poucas mudanças, a principal mudança está no uso da tecnologia MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) que permite que a placa *Wireless* utilize diversos fluxos de transmissão, através do uso de vários conjuntos de transmissores, receptores e antenas, transmitindo os dados paralelamente [23].

Exemplificando, seria a criação de pontos de acesso com dois emissores e dois receptores (2x2), dois emissores e três receptores (2x3), três emissores e três receptores (3x3) ou quatro emissores e quatro receptores (4x4). Os pontos de acesso 2x2 podem utilizar apenas duas antenas, os 2x3 ou 3x3 precisam de três antenas, enquanto os 4x4 precisam de quatro antenas.

A princípio, esta topologia parece não ter sentido, já que muitas antenas emitindo e recebendo sinal em várias frequências, ao mesmo tempo, poderiam gerar interferências, ocasionado cancelamento de sinal. Mas tal problema explica-se através da utilização de reflexão de sinal ou *Spatial Multiplexing*, pela tecnologia MIMO. O sinal sai de antenas diferentes e percorrem caminhos diferentes, fazendo com que o sinal não chegue ao mesmo tempo [30].

#### **2.2.5 Roaming (handover)**

Assim como nas redes celulares, o processo de *handover* em redes IEEE 802.11 consiste em mover-se de uma área de cobertura para outra, ou seja, consiste em mover-se de um ponto de acesso para o outro. O *handover* eficiente precisa ser transparente ao usuário, ou seja, permitir que as estações continuem enviando e recebendo informações.

Para que o processo de *handover* aconteça existem duas funções primordiais, são elas: função de *scanning* que ao ser ativado procura uma rede com qualidade de comunicação para que o roaming possa ser realizado e a função do *roaming* que funciona da seguinte forma: [31]

- A estação, ao perceber que a qualidade da conexão atual ao seu ponto de acesso é insuficiente, começa a buscar por outro ponto de acesso.
- A estação escolhe então um novo ponto de acesso baseada, por exemplo, na potência do sinal, e envia um pedido de adesão à célula deste novo ponto de acesso.
- O novo AP envia uma resposta de adesão, e a estação passa a pertencer a essa nova BSS.

Esses procedimentos no entanto, estão sendo aperfeiçoados na especificação 802.11r (*fast handoff*), que ainda está em desenvolvimento [31].

## **2.3 LTE**

### *2.3.1 Evolução das Redes Móveis*

Mudanças vêm acontecendo ao longo dos anos nas gerações de telefonia celulares. Na 1G (Primeira geração de telefonia móvel), o sinal era analógico e tinha tendência a sofrer interferências. A falta de criptografia permitia que o sinal fosse interceptado e que o telefone fosse clonado.

Com a 2G veio o sinal digital, com isso vantagens como codificação digital de voz mais robusta, maior eficiência espectral, melhor qualidade de voz, facilidade de comunicação de dados e a criptografia. Com essa geração ganhou-se um recurso que se tornou extremamente popular: o Torpedo SMS (*Short Message Service*) e MMS (*Multimedia Messaging Service*), além de já ser possível navegar na internet com taxas de 20kB a 50kB.

A terceira geração (3G) trouxe avanços muito significativos para a telefonia móvel. Ela proporcionou que novos serviços fossem desenvolvidos, como o acesso aplicações via internet, realização de vídeos chamadas. Passou-se a ter velocidades entre 384 kB a 2 Mbps, com isso a ênfase pelo tráfego de dados estava cada vez mais evidente. Além do aumento da velocidade tivemos ainda a total compatibilidade com as redes 2G.

Com o crescimento da demanda por maiores taxas de dados, estudos foram feitos, e o LTE surgiu, que é uma comunicação móvel por rádio, visando à melhoria do padrão de telefonia móvel UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*), utilizando de uma maneira mais eficiente o espectro disponível, melhorando a qualidade dos serviços e reduzindo custos.

### 2.3.2 Arquitetura LTE

O 3GPP é um projeto em âmbito mundial, criado através da união de diversas organizações, o projeto visa definir padrões para o sistema de 3ª geração. As especificações criadas pelo 3GPP formam um documento, denominado, *release*. O release 8 lançou o LTE.

Os desenvolvedores tiveram como objetivo, quando criaram o LTE, obter altas taxas de transmissões, se comparado às tecnologias anteriores. Porém, para isso abriram mão da compatibilidade com sistemas com terminais móveis de sistemas anteriores. A principal novidade do LTE foi a técnica de múltiplos acessos utilizadas: OFDM e MIMO.

Além do LTE, o 3GPP está também definindo arquitetura de rede baseada em IP. Esta arquitetura é definida como parte do esforço da SAE – Evolução da Arquitetura de Sistema. A arquitetura e os conceitos LTE-SAE foram planejados para um suporte eficiente ao mercado de massa de qualquer serviço baseado em IP. A arquitetura baseia-se numa evolução do núcleo de rede GSM (*Global System for Mobile Communications*)/WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*), com operações e implementação simples e econômica [32]. A seguir, na Figura 7 é ilustrado um esquema da arquitetura LTE, comparando-o com o UMTS.

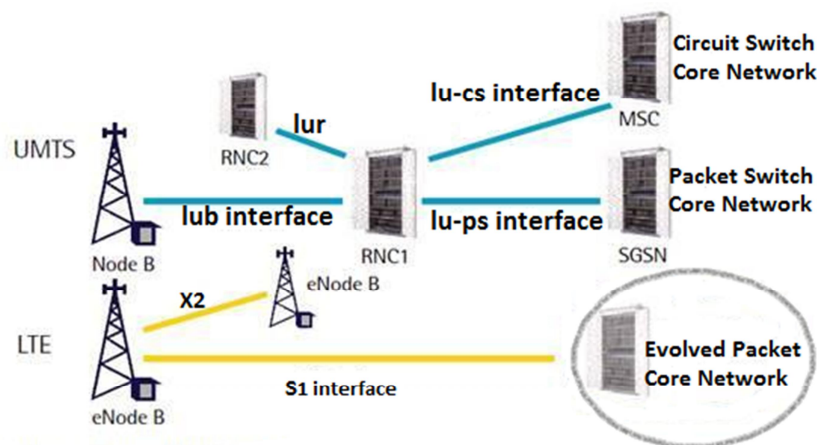


Figura 7 Arquitetura UMTS e LTE [33]

A arquitetura de rede EPC (*Evolved Packet Core*) é modelada para permitir a integração com outras redes de comunicação baseadas no protocolo IP, utilizando a comutação por pacotes. Essa tecnologia também permite conectividade com outras formas de acesso, tanto as padronizadas pelo 3GPP como as de banda larga fixa, como a DSL.

A rede utilizada no LTE é considerada mais simples do que as utilizadas em redes anteriores, uma vez que os pacotes são processados e gerenciados no núcleo EPC. Esse processo produz respostas mais rápidas, melhorando a taxa de transmissão e o tempo de latência [32].

O componente eNodeB (*Enhanced NodeB*), também chamado de eNB, passou a substituir as funções do RNC (*Radio Network Controller*), conectando-se diretamente ao núcleo EPC.

Uma característica comum em redes sem fio é a rápida variação na taxa de transmissão de dados. A fim de contornar esse obstáculo, a arquitetura LTE faz uso de retransmissão no eNodeB para gerenciar tal variação. A adoção de mecanismos de controle de fluxo no núcleo principal da arquitetura EPC colabora para evitar perda de dados ou *overflow* [33].

Como visto na figura 7, a arquitetura da rede LTE, tem basicamente dois componentes: a eNodeB e o núcleo da rede, que é conhecida como SAE e é baseada no EPC. A eNodeB agrega todas as funções antes exercidas pela NodeBs e RNCs, ou seja, realiza funções de gerenciamento de recursos, controle de admissão, escalonamento, compressão de cabeçalho, criptografia, negociação de QoS (*Quality of Service*) no *uplink* e *broadcasts* contendo informações da célula. Além disso, as eNodeB podem comunicar-se diretamente através da interface X2, além de se comunicarem com o EPC através da interface S1 [34][35].

Já no núcleo, o seu principal componente é o EPC. No EPC estão contidos os principais elementos da rede. As funções desempenhadas por cada elemento são descritas abaixo:

- MME (*Mobility Management Entity*): é o elemento de controle principal no EPC. Entre as suas funções estão autenticação, segurança, gerenciamento de mobilidade, gerenciamento de perfil do usuário, conexão e autorização de serviços.
- S-GW (*Serving Gateway*): faz o roteamento dos pacotes de dados dos usuários entre a rede LTE e outras tecnologias como o 2G e 3G utilizando a interface S4. Gerencia e armazena informações do UE como parâmetros de serviços IP suportados e informações sobre o roteamento interno dos pacotes na rede [34].
- P-GW (*PDN Gateway*): é o roteador de borda entre o EPS e redes de pacotes externas. Realiza a alocação endereços IP para o usuário, filtragem de pacotes e auxilia o PCRF na aplicação de políticas de QoS [34].
- PCRF (*Policy and Charging Rule Function*): se refere ao elemento de rede LTE que é responsável pelo PCC – Política e Controle de Carga. O PCRF decide quando e como se deve gerenciar os serviços em termos de QoS e dá informações a respeito para o P-GW e se é aplicável para o S-GW. Desta forma, provê o QoS adequado para que os serviços solicitados possam utilizar os recursos apropriados.



- HSS (*Home Subscriber Server*): se refere ao elemento LTE que é o banco de dados de registro do usuário.

A fim de se comparar as tecnologias juntamente com a evolução que houve, segue a Tabela 1, com as principais características das tecnologias.

**Tabela 1 Características das Principais Tecnologias Celulares [9]**

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

## 2.4 Handover

Nas redes móveis, um dos grandes atrativos, é a possibilidade de mobilidade que o usuário tem. Com isso procedimentos, como o de *handover* precisa ser feito, e para a satisfação do usuário, de maneira transparente.

As especificações do 3GPP definem o RSRP (*Reference Signal Received Power*) ou potência de sinal de referência recebida, como a medida de entrada para o algoritmo de *handover* [36].

O RSRP é definido como a média linear sobre as contribuições de potência dos *resource elements* que transportam sinais de referência específicos de células dentro da largura de banda de frequência de medição considerada. [9]

As eNodeB atual e vizinhas do usuário tem os seus RSRP medidos. As células são classificadas a partir disso, no momento de seleção de célula e *handover*.

O usuário monitora a célula atual o qual está conectado (*SeNB* – *serving eNodeB*) e suas células vizinhas (*NeNBs* – *neighboring eNodeB*) realizando, periodicamente medições de rádio *downlink* (RSRP), afim de identificar se a célula vizinha possui uma melhor condição (RSRP), já que ao se mover pode enfrentar diferentes condições de propagação e interferência.

O 3GPP descreve os vários eventos que podem acionar um *handover*, dentre os quais, o principal é o evento A32. De acordo com o evento A32, o *handover* é iniciado, quando a seguinte condição, da fórmula 1, for atendida por um determinado tempo. O mesmo é acionado pela *eNodeB*, com base nos relatórios de medição (*Measure Report*) recebidos do usuário. A condição é:

$$RSRP_{NeNB} > RSRP_{SeNB} + Hys \quad (1)$$

Onde, *Hys* (*hysteresis*), é uma margem de segurança, para assim reduzir as chances de *handover* mal sucedido. Os valores de *Hys* válidos variam entre 0 e de 10 dB com passos de 0,5 dB, o que resulta em 21 valores de *Hys* possíveis. Outro parâmetro importante no processo de *handover* é o *time-totrigger* (TTT) ou tempo para o gatilho. O TTT define o tempo durante o qual a condição da Equação 1 deve ter atendida para iniciar um *handover*. Os valores de TTT para as redes LTE são especificados pelo 3GPP [36] são 16 possíveis valores (0, 0,04, 0,064, 0,08, 0,1, 0,128, 0,16, 0,256, 0,32, 0,48, 0,512, 0,64, 1,024, 1,280, 2,560 e 5,120), todos definidos em segundos [9] [37].

#### 2.4.1 Processos de Handover

A condição descrita na fórmula 1, sendo atendida, o processo de *handover* é iniciado, da seguinte forma:

- A *SeNB* configura o procedimento de medição no Usuário.
- Um relatório de medição (*MEASURE REPORT*) é enviado pelo usuário para *SeNB* quando algumas condições são atendidas (ex: evento A3).
- A decisão de *handover* é tomada pela *SeNB* baseada no relatório de medição.
- Uma mensagem de *HANDOVER REQUEST* é enviada pela *SeNB* para a *TeNB* (*Target eNodeB*) com todas as informações necessárias para realizar o *handover*.
- A *TeNB* pode realizar um processo de controle de admissão dependendo das informações de QoS recebidas. Basicamente, a *TeNB* avalia se existem recursos disponíveis para atender o usuário.

- Caso existam recursos, os mesmos são configurados e uma mensagem de *HANDOVER REQUEST ACKNOWLEDGE* é enviada para *SeNB*. Caso contrário o *handover* é rejeitado.
- Um comando de *HANDOVER* é enviado da *SeNB* para Usuário. O Usuário se desconecta da *SeNB* e conecta na *TeNB*. [9].

## 2.5 4G e LTE-Advanced

De maneira errônea o LTE é considerado muitas vezes como 4G. O ITU definiu alguns requisitos os quais uma tecnologia precisa ter para poder ser considerada 4G. Dentre os requisitos está o suporte a taxa de 100 Mbit/s para situações de alta mobilidade e de até 1 Gbit/s para aquelas de baixa mobilidade.

Em meio às discussões sobre as futuras tecnologias, em termos de mobilidade, um aspecto tido como garantido diz respeito à necessidade de ampliar a capacidade de fornecer maiores volumes de tráfego de dados, o que solicita novos projetos de rede, bem como mais espectro disponível. O padrão *LTE-Advanced* vem sendo desenvolvido pela 3GPP a fim de ir ao encontro dessa necessidade.

Requisitos definidos pelo ITU para um sistema móvel ser considerado de 4ª Geração [38]:

- Rede totalmente IP com comutação de pacotes.
- Interoperabilidades com os padrões *Wireless* existentes.
- Uma velocidade de 100 Mbit/s com o usuário em movimento e 1 Gbit/s com o usuário sem movimento.
- Compartilhar dinamicamente os recursos da rede para suportar mais usuários simultâneos.
- Largura do canal escalável de 5-20 MHz, opcionalmente até 40 MHz
- Eficiência espectral de 15 bit/s/Hz, no *downlink*, e 6,75 bit/s/Hz, no *uplink* (o que significa que 1 Gbit/s no *downlink* com um canal inferior a 67 MHz)
- Eficiência espectral do sistema de até 3 bit/s/Hz/célula no *downlink* e 2,25 bit/s/Hz/célula para uso indoor.
- *Roaming* global através de múltiplas redes.
- Capacidade de oferecer serviços multimídia de alta qualidade.

## 2.6 Femtocell /Arquitetura

Estima-se que 2/3 das chamadas e mais de 90% do tráfego de dados de uma rede celular, ocorrem em ambiente indoor. Algumas pesquisas mostram que 45% das residências e 45% das empresas possuem uma péssima experiência em relação à cobertura indoor [39].

Necessidades como melhor cobertura indoor, o 3GPP no *release 8*, surgiu com a ideia de *Femtocell*, que são pequenas estações-base de baixa potência, que fornecem cobertura de rádio de 10 a 50 metros para os usuários móveis em um ambiente *indoor*, como casas e escritórios. São chamadas de *Home NodeB* (HNB) em sistemas WCDMA e *Home e Node B* (HeNB - *Home Enhanced NodeB*) em sistemas LTE. Estas são instaladas em uma cobertura *indoor* pelo usuário, é como os já utilizados roteadores *Wireless* (Wi-Fi).

As mesmas fornecem quase todas as funcionalidades celulares para os usuários finais, como serviços de voz e dados. A ideia é que em cada ambiente possa ter instalada uma *Femtocell* e que os receptores sem fio dentro do alcance a utilizem para comunicação no lugar da *macrocell*.

O conceito de *Femtocell* pode ser aplicado a qualquer tecnologia de comunicação sem fio, como WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave*), 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).

A Figura 8 apresenta a arquitetura de uma rede a qual utiliza *Femtocell*. Nela observa-se que o usuário conecta-se a *Femtocell*, através da comunicação sem fio. A *Femtocell* é ligada ao núcleo da rede através do roteador de banda larga (*broadband router*).

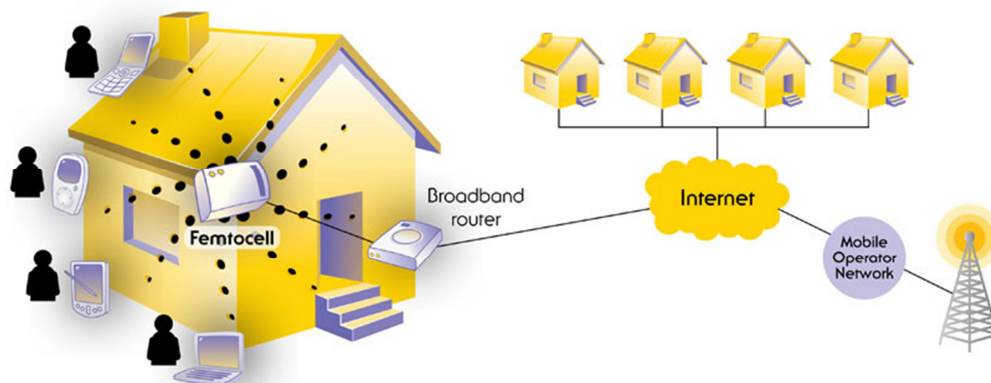


Figura 8 Arquitetura redes com *Femtocell* [40]

A arquitetura da rede *Femtocell* é composta de três elementos principais: A *Femtocell* (HNB), que incorpora as funcionalidades da NodeB e RNC da UTRAN (UMTS), já na

EUTRAN (LTE) a HNB, chamada de HeNB, agrega as funções da eNodeB. Mais detalhes sobre esta arquitetura podem ser encontrados em [41]. A HNB se conecta aos usuários 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 *Security Gateway* (SeGW) usa IPSec (*Internet Protocol Security*) 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 [9] [42].

Em [43] 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).

### 2.6.1 Características

A utilização de *Femtocell* juntamente com a sua arquitetura trazem consigo algumas características, descritas a seguir:

#### 2.6.1.1 Alocação de Canais de Frequências

Para o seu funcionamento as *Femtocells* exigiriam uma parte do espectro das operadoras. Esta alocação do espectro pode ser de dois modos, o primeiro, a *Femtocell* pode usar uma parte separada do espectro das operadoras. No segundo modo a *Femtocell* utilizaria a mesma porção, tal como as *macrocells* utilizam, sendo assim, uma alocação co-conal.

O primeiro modo traz a vantagem de não haver interferência entre as mesmas, em contrapartida, este método pode desperdiçar recursos já que nem sempre existirá uma *Femtocell* utilizando o canal reservado. Já o segundo modo, se teria um uso mais eficiente do espectro, facilitaria o processo de *handover* e o processo de busca por células. Por outro lado, pode ocorrer a interferência entre a *Femtocell* e *macrocell* que, se não for administrado, pode degradar significativamente a qualidade do sinal. [44].

#### 2.6.1.2 Interferência

Este é um dos desafios mais importantes para a implantação densa de *Femtocells*. As operadoras preferem implantação co-canal das *Femtocells* para aumentar suficientemente a capacidade global, mas isto faz com que o problema de interferência seja forte [45].

Pode-se dividir os tipos de interferência em dois grandes grupos, são eles: interferência entre *Femtocell-Femtocell* e interferência entre *Femtocell-macrocell*. A interferência entre *Femtocell-Femtocell* é mostrada na Figura 9, e a interferência entre *Femtocell-macrocell* é mostrada na Figura 10.

A implantação da *Femtocell* é aleatória e podem ser instaladas muito perto uma da outra. Como, por exemplo, em apartamentos vizinhos, somente a parede de separação pode não ser o suficiente para evitar interferências uma com a outra.

Os métodos de acesso utilizados nas *Femtocells* tem um enorme impacto sobre a interferência global. A interferência *Femtocell-Femtocell* é mais grave no acesso fechado, em comparação com o acesso aberto. Existem 3 tipos de acesso nas *Femtocell*: aberto, fechado e híbrido. No primeiro caso, qualquer usuário próximo a uma *Femtocell* pode utilizá-la; no segundo caso, somente os usuários previamente cadastrados e dentro da região de alcance da *Femtocell* podem utilizá-la e o último caso é aquele em que ambos os usuários subscritos e não subscritos podem utilizar a *Femtocell*, mas há prioridade para os subscritos [9].

A interferência, no *uplink*, em se tratando da interferência *Femtocell-Femtocell* é causada pelos usuários. O usuário *Femtocell* age como uma fonte de interferência com as *Femtocells* vizinhas. Por exemplo, em um sistema CDMA (*Code Division Multiple Access*), os vizinhos imediatos de um usuário são a principal fonte de interferência *uplink*. Se transmite a uma potência alta, ele irá afetar a *Femtocell* vizinha e o desempenho será degradado.

Já o *downlink* é prejudicado pelas interferências ocasionadas pela *Femtocell*, uma vez que a esta causa interferência nos usuários vizinhos. Esse processo pode ser mais bem visto na Figura 9.

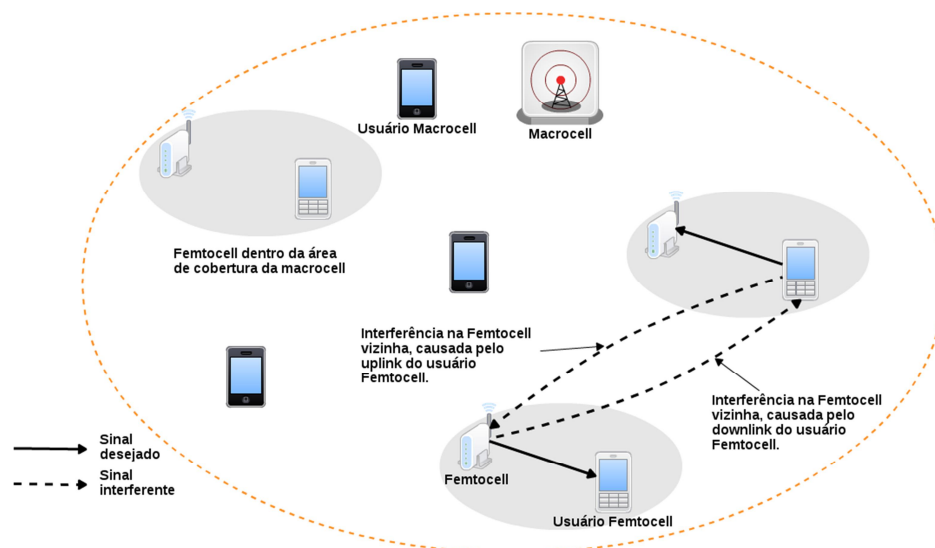


Figura 9 Interferência *Femtocell – Femtocell* [46]

Já nas interferências *Femtocell-macrocell* uma *Femtocell* pode causar interferência no *downlink* de um usuário da *macrocell*, como pode ser visto na Figura 10. Um usuário na *macrocell* também pode causar interferência no *uplink* de uma *Femtocell* nas proximidades.

A *Femtocell* causaria uma grande interferência nos vizinhos que estariam usando os serviços da *macrocell* nos ambientes indoor. Esse problema se torna mais grave no caso da modalidade de acesso fechado. No caso das *Femtocells* usarem a porção separada do espectro, não haveria interferência *Femtocell-macrocell*. No entanto, se as faixas são adjacentes uns aos outros no domínio da frequência, pode haver interferência de canal adjacente.

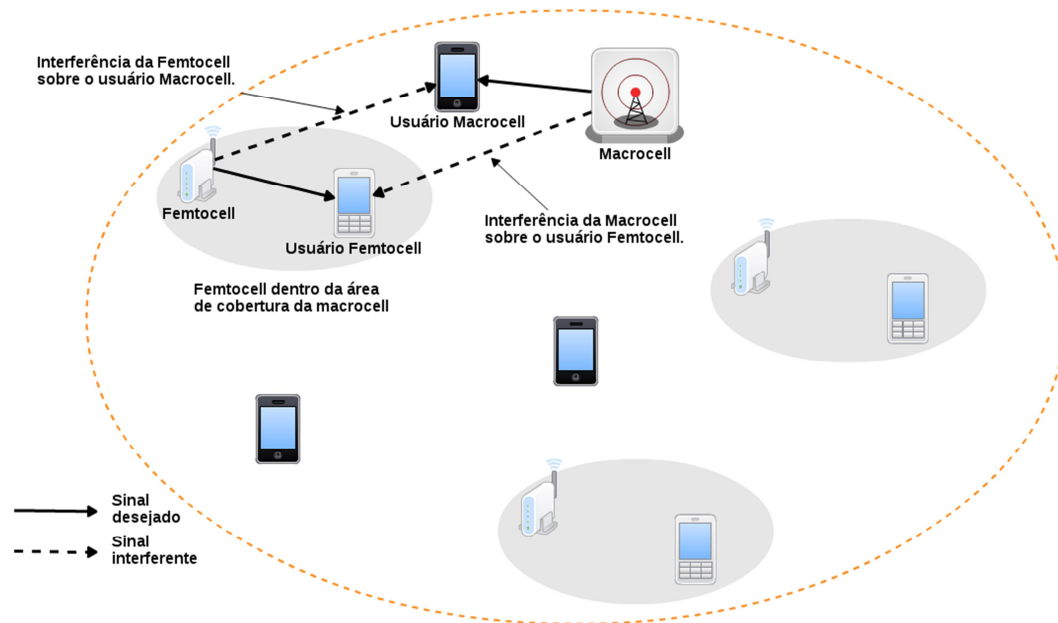


Figura 10 Interferência *Femtocell - macrocell* [46]

## 2.7 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado o levantamento do estado da arte das tecnologias envolvidas nesta pesquisa, contemplando as principais características das redes WLAN e LTE/*Femtocell*. Foi possível mostrar os desafios que a *Femtocell* enfrenta para uma possível densa instalação. No próximo capítulo serão apresentados os trabalhos relacionados a esta pesquisa, enfatizando não só os estudos que demonstram os desafios técnicos em discussão, como também, mostrar as pesquisas que vêm sendo publicadas na literatura em consonância com o estudo desta dissertação.

### 3 TRABALHOS CORRELATOS

#### 3.1 *Considerações Iniciais*

Neste capítulo serão apresentados alguns trabalhos que contribuíram para a construção dessa dissertação, desde a motivação ao embasamento teórico. Estes trabalhos serão divididos em três principais ramos: primeira área que lista os problemas proeminentes da *Femtocell*, fazendo-se assim, questionar se ela é realmente a tecnologia mais promissora para suprir a necessidade de cobertura *indoor* ou até mesmo para o descarregamento do tráfego das redes móveis.

Segundo os trabalhos encontrados na literatura que de alguma forma comparam as redes WLAN e *Femtocell*, assim, apresentando-se as similaridade e diferenças existentes entre as duas redes.

A terceira aborda o uso da WLAN para o descarregamento de tráfego de dados móveis, contribuindo para verificar se a WLAN poderia, no futuro, torna-se a tecnologia com melhor custo-benefício para o descarregamento de tráfego das redes móveis ou se a sua utilização é inviável. Em todos os trabalhos será dado enfoque aos aspectos de interesse a esta dissertação.

#### 3.2 *Trabalhos Relacionados*

As *Femtocells* surgiram como alternativa para suprir a necessidade de melhorar a cobertura *indoor*, pareceu uma solução promissora. Há muitos estudos que abordam a utilização de *Femtocells* e apontam seus benefícios de utilização. Entretanto, não é proporcional o número de trabalhos que exploram os contrapontos da implantação ou ainda, que promovam o questionamento quanto à eficácia de utilização. Os trabalhos a seguir, mostram os principais desafios encontrados na utilização da *Femtocell*:

Em [46, 47,48] é dada uma visão geral dos principais desafios quanto à utilização das *Femtocells*. Desafios estes, que terão maior importância quando as implantações de *Femtocells* tornar-se mais densa em ambiente urbano. São eles:

- Modo de acesso: *Femtocell* pode suportar um número limitado de usuários e, portanto, deve ser clara quanto ao que o usuário pode acessar uma *Femtocell* específica. Modos de acesso tem um impacto direto sobre a interferência no sistema e, por consequência, deve ser cuidadosamente selecionado depois de muita análise. Três modos de acesso foram definidos para um *Femtocell*, são eles: aberto, fechado e híbrido.



- Gestão de mobilidade e de *Handover*: Com a densa implantação das *Femtocell* haveria uma necessidade de procedimentos de *handover* e gestão da mobilidade. Tanto entre *Femtocell-Femtocell* como *Femtocell-macrocell*, e assim por diante.
- Auto-configuração: *Femtocells* são implantadas por usuários finais e pode ser ligado e desligado a qualquer momento, portanto, a implantação é completamente aleatória. O número e os locais de *Femtocells* podem variar continuamente dentro de um *macrocell*. Isso torna o planejamento clássico de redes e ferramentas de *design* para configuração e otimização, em uma rede *Femtocell*, inutilizável. *Femtocells* precisam ser capazes de se auto configurar e otimizar sem causar qualquer impacto sobre o sistema celular existente.
- Segurança: Proporcionar segurança eficiente às redes *Femtocell* é um dos principais desafios. No caso do modo de acesso aberto, a segurança é de grande importância como os usuários de informações privadas, precisa ser protegido. A rede *Femtocell* é propensa a muitos riscos de segurança. Por exemplo, a informação privada do assinante viaja através da conexão do *backhaul* Internet. Estes dados podem ser *hackeado*, o que violaria a privacidade e confidencialidade.
- Gestão de Interferência: Este é um dos desafios mais importantes para a densa implantação das *Femtocells*. Como muitas *Femtocells* e *macrocell* estão usando a mesma fração do espectro, estas podem causar interrupções um no outro.

Os trabalhos a seguir fazem uma comparação de certos aspectos entre da WLAN e a *Femtocell*, já que essas duas tecnologias são as mais promissoras para ajudar a suprir o crescente aumento dos dados móveis.

Em [49] se dá uma visão geral sobre as principais similaridades e diferenças na arquitetura, operação e padrão entre as redes WLAN e a *Femtocell*. Ele questiona se o fato de as redes *Femtocell* e WLAN terem muita coisa em comum, já que os sistemas celulares aproximam se da arquitetura WLAN, através de, por exemplo, serviços oferecidos e taxas de dados, e pela *Femtocell* usar a rede IP com *backhaul* em vez da infraestrutura de rede celular convencional existente, a *Femtocell* iria substituir a tecnologia WLAN existente. No entanto, há questões que as distinguem e que possam levar à aceitação de uma tecnologia em detrimento da outra. Este artigo aborda uma comparação preliminar da tecnologia *Femtocell* com redes WLAN para compreender a dinâmica do mercado no futuro. Ele aborda aspectos, como faixas de frequências, interferências e *handover*.

Em [50] teve como objetivo investigar a eficiência energética de redes *Femtocell* e 802.11 em cenários convencionais e alternativos através da concepção de um quadro de comparação de desempenho justa e escalável e realizar comparações aprofundadas com base neste quadro.

No cenário de linha de base convencional, APs 802.11n são implantados em três canais não sobrepostos usando uma largura de banda total de 60 MHz, enquanto *Femtocells* são assumidas para operarem nas mesmas frequências com uma largura de banda total de 20 MHz. No cenário alternativo, ambos os APs 802.11n e *Femtocells* têm uma largura de banda total de 20 MHz com um padrão de reutilização de frequências de 1 e 3, respectivamente. Um simulador de nível de sistema para avaliar uma multi-célula multi-usuário com SISO e antena de rede *Femtocell* LTE com configurações MIMO foram implementadas, e um modelo analítico para avaliar o desempenho da rede 802.11n também é desenvolvido.

Dentre os resultados obtidos, foi percebido que no AP 802.11n o usuário atinge o maior QoS e maior média de largura de banda quando se utiliza plenamente a sua largura de banda de 60 MHz com padrão de reutilização de frequência 3. Considerando os graves efeitos de interferência co-canal que a *Femtocell* sofre, o QoS do usuário cai drasticamente quando o número de *Femtocell* é maior do que 1 no cenário convencional.

O aumento no uso de *smartphones* trouxe a crescente carga de tráfego de dados com ele. As operadoras estão procurando soluções de baixo custo para superar o problema de infraestrutura de 3G para cenários de tráfego de alta contenção. Várias propostas foram oferecidas como alternativas para solucionar ou minimizar este problema, estas trouxeram alguns custos extras, incluindo a implantação de *Femtocell* ou WiMax, LTE, sistemas avançados de LTE, juntamente com o seu equipamento caro.

Por outro lado, tecnologias como 802.11 podem ser exploradas, pois possuem grandes atrativos como comunicação de banda livre e infraestrutura já implementada em todo mundo. Não seria esse uma alternativa mais inviável, utilizar da infraestrutura já existente das tecnologias 802.11, para soluções como o descarregamento de tráfego? Os trabalhos a seguir abordam esta temática.

Em [51] foi proposto um método de qualidade de experiência (QoE - *Quality of Experience*) com base no *handover* vertical em redes colaborativas heterogêneas em tempo real. A interação entre uma rede 3G e WLAN para fazer um descarregamento de tráfego foi analisada e simulada.

Neste estudo focaram-se na melhoria da rede e nas preferências do usuário, como custo ou segurança, e considerou-se a HWN (*Heterogeneous Wireless Networks*) onde UMTS e

WLAN são acoplados. Com base nos resultados, obtiveram um alto valor de MOS (*Mean Opinion Score*.) durante a transmissão de vídeo e melhor experiência do usuário.

Em [52] foi utilizado um cenário o qual foi considerado comum num futuro próximo: Os dispositivos têm grandes, mas, limitada quantidade de armazenamento; os usuários possuem dispositivos móveis que podem fazer *download* e produzem ricos conteúdos multimídia; os usuários podem querer fazer *upload* de seu conteúdo para servidores remotos; haverá disponibilidade onipresente de recursos de computação em nuvem de baixo custo, e os usuários podem fazer *upload* de seus arquivos e *download* de arquivos de mídia a partir da nuvem facilmente.

O cenário considerado foram áreas metropolitanas já que elas têm alta densidade populacional, e exigências de conteúdo elevadas. Foi considerado um cenário em que não há cobertura abundante de rede 3G em grandes áreas com um plano de pagamento de taxa fixa para serviços de dados.

Neste trabalho foi proposta uma abordagem DTN (*Delay Tolerant Networking*), aproveitando o fato de que uma quantidade significativa de dados móveis é tolerante a retardo por natureza. Os tipos de dados de destino são dados e vídeos em massa, que respondem por 64% do tráfego móvel do mundo até 2013. Certos dados de ligação ascendente criada por sensores, e aplicações M2M (*Machine to Machine*) como sensores remotos não requerem a transmissão de dados em tempo real.

Explorando essa característica intrínseca dos dados, foi proposta uma arquitetura integrada *Metropolitan Advanced Delivery Network* (MADNet), que consiste de redes celulares, redes WiFi e *mobile-to-mobile Pocket Switched Networks* (PSNs). Pois, se acreditou que essa arquitetura poderia fornecer uma solução de baixo custo em paralelo com outras soluções, como HSPA (*High Speed Packet Access*) e *Femtocells*.

Usando vestígios de mobilidade reais da cidade de São Francisco, foi mostrado que apenas poucas centenas de pontos Wi-Fi (APs) implantados em uma área de 313.83km<sup>2</sup> podem descarregar metade dos dados móveis da rede 3G, nas configurações do cenário proposto no artigo tanto para *download* e *upload*.

Em [53] foi proposto uma estrutura de descarregamento de dados para redes celulares utilizando *Femtocell*, através de redes WLAN. Propôs-se colocar *Femtocell* em transportes públicos, como os ônibus. Assim, os usuários móveis dos ônibus utilizaram a cobertura fornecida pela *Femtocell*. Todos os veículos têm um transmissor WLAN instalado no teto para utilizar os pontos de acesso WLAN urbanos, que são amplamente utilizados e cobrem

muitas cidades urbanas, como *backhaul*. Os dispositivos móveis estão conectados nas *Femtocells* ao invés em vez das *macrocell*.

Foi levado em consideração a capacidade das *Femtocell* em termos de usuários acomodados e largura de banda total disponível. Os usuários foram categorizados em diferentes classes de prioridades, a fim de alocar eficientemente a largura de banda da *Femtocell* para número máximo de usuários. Em seguida, o tráfego de dados móveis é encaminhado para a rede da operadora de celular através da WLAN, aliviando as *macrocells* carregadas.

O descarregamento da *macrocell* através dessa arquitetura melhorou significativamente a rede celular global, podendo descarregar até 50% do tráfego de dados das *macrocell* quando a largura de banda das *Femtocell* está saturada. Assim, há notavelmente menos necessidade de atualizar ou modificar a infraestrutura de rede.

Em [54] foi proposto analisar os aspectos econômicos do descarregamento Wi-Fi, modelando a interação entre um único fornecedor e os usuários com base em um jogo sequencial de dois estágios. Foram modelados usuários com quatro atributos, sendo eles, a quantidade de dinheiro que eles podem pagar; a quantidade de dados que deseja usar; qual a tolerância de atraso de cada usuário e como se movem. Foi-se provado analiticamente que o descarregamento Wi-Fi é economicamente, benéfico tanto para o fornecedor quanto para os usuários. Além disso, foi realizada uma análise numérica para quantificar o ganho prático, onde o aumento varia de 21% a 152% na receita fornecedores, e de 73% para 319% no superávit usuários.

### **3.3 Considerações Finais**

Dado o esperado aumento dos dados móveis nos próximos anos, e os problemas de congestionamento que esse maior fluxo causa, surgem as possibilidades de soluções. Os trabalhos aqui citados instigam o debate de qual solução seria mais viável. Levar aspectos como o custo que seria necessário para a implantação às soluções é importante. Para que não haja o aumento do CAPEX e OPEX das operadoras.

## 4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

### 4.1 *Introdução*

Segundo [55], avaliar um sistema é pronunciar-se sobre as características deste sistema. Dado um sistema real qualquer, uma avaliação deste pode ser definida como toda e qualquer observação feita sobre ele.

Como um determinado sistema poderá ter seu desempenho avaliado, depende diretamente das suas características. Quando o sistema envolvido é computacional, pode-se dividir a avaliação em dois paradigmas distintos:

- Aquele que precisa obter medidas no próprio sistema, e a partir delas o avaliador pode estabelecer uma interpretação em relação ao desempenho;
- Aquele que se baseia em criar-se uma abstração (modelagem) do sistema, através da qual se pode estabelecer certo prognóstico (com um grau de incerteza associado) a respeito do desempenho desse sistema.

Há uma relação custo/benefício embutida na questão dos paradigmas, que está relacionada ao quanto se pode permitir de intrusão e qual o grau de imprecisão que é aceitável [55].

### 4.2 *Passos para Avaliação de Desempenho*

- Definir os objetivos e limites do sistema.
- Selecionar as métricas
- Selecionar as técnicas de avaliação
- Analisar e interpretar os dados
- Refazer todo o estudo, se necessário.
- Apresentar os resultados

Avaliação de Desempenho é uma estratégia que, a partir de métrica(s), apresenta diagnósticos sobre o comportamento do sistema. As métricas, por sua vez, são critérios usados para quantificar o desempenho de um sistema. Em um estudo de desempenho, geralmente uma ou mais métricas são escolhidas para serem coletadas e comparadas para diferentes situações [56].

Exemplos de métricas mais utilizadas são: utilização, vazão e tempo de resposta.

### 4.3 Técnicas de Avaliação de Desempenho



Figura 11 Técnicas de avaliação de desempenho

Segundo [55], para a escolha da técnica de avaliação, alguns quesitos são de grande importância, são eles:

- O estágio do ciclo de vida que o sistema se encontra. Medições são possíveis somente se algum sistema similar ao proposto já existir. Modelagem analítica e simulação podem ser utilizadas quando a medição não é possível.
- O tempo disponível para a avaliação. Em quase todas as situações os resultados são exigidos para ontem. Neste caso a modelagem analítica deve ser a escolha, visto que simulação e medições levam um tempo maior.
- O nível de precisão desejado. Geralmente a modelagem analítica exige muitas simplificações e suposições. Simulações podem incorporar mais detalhes e requerem menos suposições, assim frequentemente é mais próximo da realidade. A medição, apesar de parecer à realidade, pode não resultar precisão simplesmente porque muitos dos parâmetros do ambiente, tal como configuração do sistema, tipo de carga, e tempo de medida podem ser únicos para o experimento.

#### 4.3.1 Modelagem

Modelagem, a qual, em uma definição simplista, baseia-se em uma associação de uma representação gráfica, denominada de modelo, e um método de cunho aleatório, que forneça medidas para avaliar-se o desempenho do sistema que foi modelado [55].

O uso de modelos torna possível a abstração de detalhes de baixo nível de um sistema, que não são importantes para a caracterização do desempenho de alto nível. Isso faz

com que o processo de modelagem seja mais simples do que outras técnicas de avaliação, já que nos permite identificar e eliminar, detalhes irrelevantes [57].

#### 4.3.1.1 Técnicas Baseadas em Processos

Abstração Funcional: o modelo é criado a partir dos procedimentos que o sistema realiza sobre os dados. Exemplos, DFD (*Data Flow Diagram*) e CFD (*Computational Fluid Dynamic*).

#### 4.3.1.2 Técnicas Baseadas em Estados

As principais técnicas são:

- Redes de Filas: O ingrediente determinante no desempenho de um sistema está associado à disputa dos recursos disponíveis pelos clientes que utilizam os serviços prestados por esses recursos. Assim, o sistema (para fins de avaliação de desempenho) pode ser visualizado como um conjunto de recursos que prestam serviços (comumente chamados de servidores) e de clientes que solicitam algum tipo de atendimento nesses recursos (eventualmente gerando filas de solicitações em um determinado servidor). Para estudar o relacionamento entre clientes e servidores, existe uma vertente dos processos estocásticos, denominado de teoria das filas [55]. Como exemplo, na Figura 12, tem-se o diagrama de representação de processos competindo por um único processador.

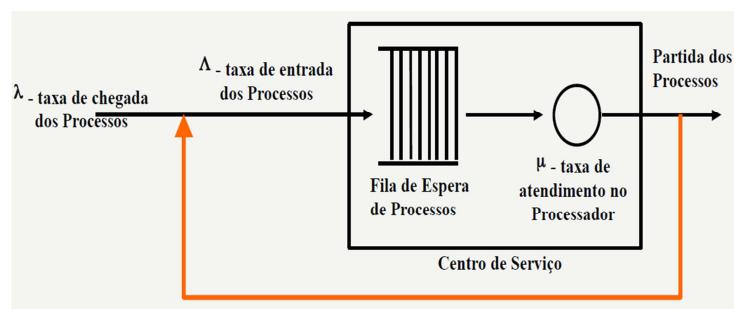


Figura 12 Representação de processos competindo por um único processador. [58]

- Redes de Petri: originalmente propostas para especificar sistemas concorrentes/paralelos, assíncronos e não determinísticos. Estas redes são baseadas em três elementos, são eles: Lugares (situações, estados); Transições (ações); Arcos (ligações entre lugares e transições). Como exemplo, na Figura

13, tem-se o diagrama de representação de processos concorrendo ao um único processador.

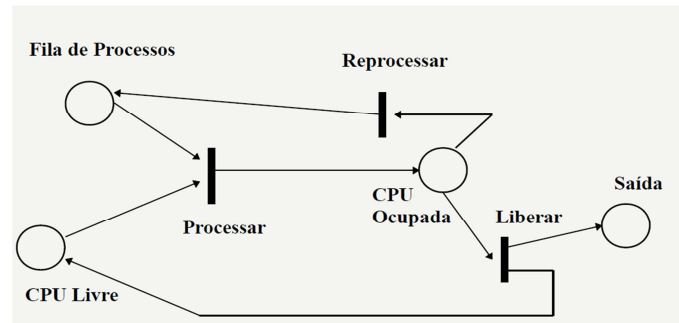


Figura 13 Representação de processos concorrendo ao um único processador. [58]

- *Statecharts*: Técnica de representação de sistemas através da visão de seus estados e a modificação deles em consequência da ocorrência de uma determinada interferência (evento). Como exemplo, na Figura 14, tem-se o diagrama de representação de processos concorrendo ao um único processador.

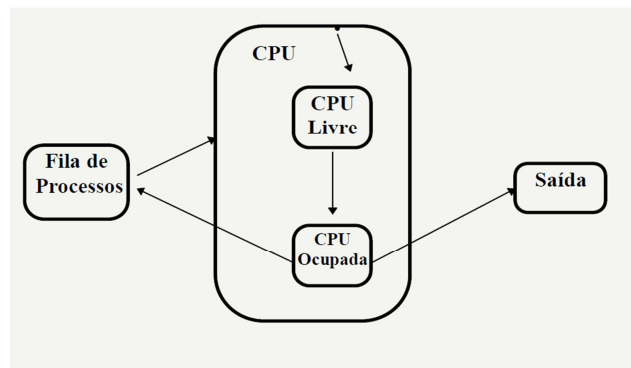


Figura 14 Representação de processos concorrendo ao um único processador. [58]

## 4.4 Soluções para o Modelo

Os modelos podem ter duas soluções, são elas: soluções analíticas e solução por simulação, assim, os com soluções analíticas são chamados de modelos analíticos, e os com solução por simulação são chamados de modelo de simulação.

### 4.4.1 Modelo Analítico

Na modelagem analítica as fórmulas matemática (que podem ser entendidas como equivalentes aos modelos de simulação) são empregadas para representar os sistemas. Esses



modelos possuem um alto grau de abstração e, portanto, de simplificação em relação aos sistemas que representam. As soluções analíticas obtidas são as respostas desses modelos e, em tese, do próprio sistema modelado, diante de estímulos (da forma de parâmetros) a eles aplicados. A teoria por trás desse tipo de abordagem é conhecida como "Teoria de Filas" e os modelos utilizados são conhecidos como "Modelos de Filas" [57].

#### Desvantagens

- É uma técnica aproximada: aproxima a realidade por um modelo;
- Suposições simplificam o modelo para que as equações sejam tratáveis;
- Perde precisão;

#### Vantagens

- É uma técnica barata: solução de equações matemáticas;
- Se o modelo for simples e a aproximação boa, é possível avaliar facilmente compromissos entre alternativas;

#### 4.4.2 Modelo de Simulação

“Simulação é o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e /ou avaliar estratégias para sua operação” [56].

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;
- Permitir obter respostas a eventos que não ocorrem naturalmente e com frequência no sistema real.

O modelo de simulação deve conter todos os detalhes realmente importantes do sistema a ser avaliado, sem, no entanto, conter a totalidade de suas características, ou seja, há certo nível de abstração nesse modelo. Essa abstração deve ser cuidadosamente planejada.

Algumas vantagens e desvantagens de simular podem ser citadas:

#### Vantagens

- Modelos de simulação podem ser construídos com níveis arbitrários de detalhes;

- Permite simular situações complexas que são analiticamente intratáveis;

#### Desvantagens

- Complexidade;
- Tempo de simulação;

#### **4.4.2.1 Tipos de Simulação**

Entre a variedade de simulações disponíveis na literatura, destacam-se as que podem ser mais interessantes para aplicações de sistemas de computadores são: simulação de Monte Carlo, simulação baseada em traces e simulação baseada em eventos discretos [56].

##### **4.4.2.1.1 Simulação de Monte Carlo**

Este é um tipo de simulação que serve para modelar fenômenos probabilísticos invariantes no tempo. É considerada uma técnica poderosa para obtenção de soluções aproximadas para problemas complexos que envolvem variáveis aleatórias. Na maioria das vezes, os parâmetros são desconhecidos e simulações de Monte Carlo podem ser aplicadas na obtenção de estimativas através da realização de varias replicações de um experimento [56].

##### **4.4.2.1.2 Simulação baseada em Traces**

Uma simulação baseada em traces é a que tem como entrada um registro que contém eventos, ordenados no tempo, observados em um sistema real. Esses registros são chamados de traces. Esta simulação é geralmente utilizada na análise de algoritmos de alocação de recursos. Assim, um trace contendo a demanda por um determinado recurso é utilizado como entrada da simulação, a qual pode incluir diferentes algoritmos para serem avaliados sob as mesmas condições de demanda.

Uma característica importante nesta simulação é a credibilidade. Um trace contendo os acessos feitos a um determinado serviço na Internet têm maior credibilidade do que informações geradas randomicamente através de alguma distribuição. Um dos principais problemas dos traces é o tamanho. Os traces são geralmente sequenciam longas e exigem um considerável tempo computacional para serem processados. Também há uma dificuldade de variação da carga de trabalho aplicada [56].

#### 4.4.2.2 Simulação Discreta baseada em Eventos

Uma simulação discreta baseada em eventos utiliza um modelo de estados discretos para o sistema. Diferente de um modelo contínuo, em um modelo discreto o sistema só pode assumir um número discreto de valores, porém o tempo de simulação pode assumir valores discretos ou contínuos.

A simulação discreta, independente da aplicação, deve conter os seguintes componentes: escalonador de eventos, mecanismo de controle de tempo (*clock*), variáveis globais que descrevem os estados do sistema, rotinas para simular os eventos, rotinas para entrada de parâmetros, rotinas para coletar resultados, rotinas de inicialização, rotinas para gerenciamento dinâmico de memória e um programa principal [56].

#### 4.4.3 Simuladores

Há vários simuladores que permitem a avaliação de cenários de rede antes de sua implantação. Entre os mais utilizados estão o OPNET, Parsec, SSF (*Sega Saturn emulator*), Arena e o *ns* (*Network Simulator-2*). Os cinco simuladores possuem características semelhantes de simulação discreta baseada em eventos no nível de pacotes e modelam uma grande quantidade de protocolos, porém cada um possui um foco diferente [56].

Algumas características dos softwares para simulação:

- Linguagens de programação convencionais: C ou Pascal;
- Linguagens de simulação: RESQ ou SIMSCRIPT;
- Extensões funcionais: SMPL ou HPSIM;
- Pacotes de uso específico: NS, ARENA, OPNET ou PROVISA.

#### 4.4.4 Solução Preferencial

Dependendo de cada sistema e de suas características dentre as soluções uma pode ser mais viável que a outra. Na Figura 15 tem-se o diagrama o qual ilustra as possibilidades.

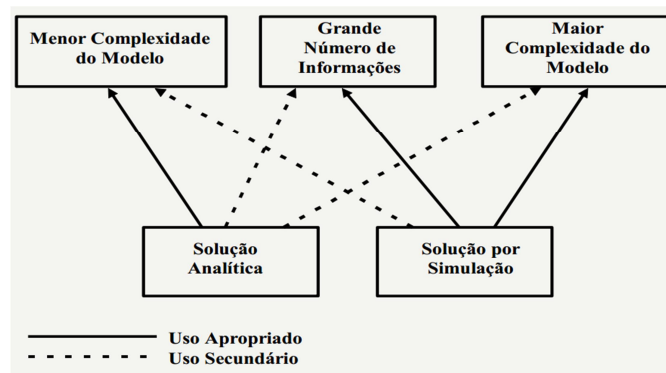


Figura 15 Solução preferencial [58].

#### 4.4.5 Aferição

É feita em sistemas reais dentre as técnicas mencionadas, esta propicia maior fidelidade dos índices obtidos, pois como a avaliação é feita com base em dados de um sistema real, não é feita nenhuma abstração (modelagem) do sistema em questão. Porém, como toda técnica esta apresenta desvantagens, como por exemplo, a necessidade da existência do sistema a ser avaliado.

Isto pode gerar problemas em relação ao custo e ao tempo, pois o sistema implementado pode não satisfazer as necessidades, tendo que ser abandonado.

##### 4.4.5.1 Protótipo

É uma versão simplificada de um sistema computacional que contém apenas características relevantes para a análise do sistema, porém ele já produz resultados com boa precisão. Podendo ser recomendado para verificação do projeto final, pois é uma ótima opção para verificação de projetos.

##### 4.4.5.2 Benchmarks

É um programa escrito em linguagem de alto nível, representativo de uma classe de aplicações, utilizado para medir o desempenho de um dado sistema ou para comparar diferentes sistemas. *Benchmark* é muito usado para avaliação de desempenho por aferição. Exemplos de *Benchmarks*: *Whetstone*, *Linpack*, *Dhrystone*.

Quando se utiliza Benchmark precisa-se ter cuidado com alguns aspectos como: a execução do Benchmark não deve influenciar na obtenção dos resultados e a unidade deve ser apropriada.

##### 4.4.5.3 Coleta de dados

É feita a partir do sistema existente, e através de ferramentas, chamadas monitores. Estes servem para observar as atividades de um sistema coletando as características relevantes para a análise do sistema.

As principais características da coleta de dados são: Resultados mais precisos, coleta deve ser não intrusiva e pode ser utilizada para validar um determinado modelo.

Vantagens:

- O desempenho do sistema real é obtido, não o desempenho do modelo do sistema;
- Interações que afetam o desempenho do sistema real podem ser difíceis de captar no modelo analítico ou no modelo de simulação;

Desvantagens:

- É necessário ter um sistema em execução;
- É necessário instrumentar o sistema;
- É difícil estimar o tempo gasto para instrumentar e realizar as medidas;
- É difícil modificar o sistema para estudar o efeito das modificações

#### 4.4.6 Solução preferencial

Dependendo de cada sistema e de suas características dentre as soluções uma pode ser mais viável que a outra. Na Figura 16 tem-se o diagrama o qual ilustra as possibilidades.

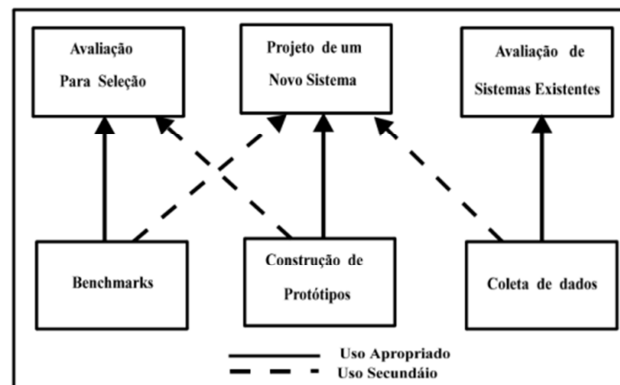


Figura 16 Solução Preferencial [58].

## 4.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados diversos conceitos mostrando que independente do método, conjunto de métodos escolhidos para se realizar a análise de desempenho ou uma simulação, refletindo o sistema real, devem-se focar os objetivos da análise. A fim de construir uma base de informações relevantes e precisas que de fato, poderão ser utilizadas na implementação das soluções exigidas pelo sistema com a finalidade de aperfeiçoá-lo.

## 5 ESTUDO DE CASOS

### 5.1 *Considerações Iniciais*

Nesta dissertação foram simulados, através do simulador de redes OPNET, um cenário WLAN e um cenário *Femtocell*. Os dois cenários apresentam 4 células, 29 usuários móveis e utilizam aplicação multimídia: VoIP (*Voice over Internet Protocol*) e Vídeo. Os cenários propostos foram criados com o objetivo de a partir dessa abordagem de simulação discreta se comparar o desempenho das duas redes.

Ao longo desse capítulo será mostrado como cada cenário foi construído, juntamente com as suas principais características. Também serão mostrados os resultados e análises de resultados obtidos através das simulações.

### 5.2 *Contextualização*

A simulação realizada nesta dissertação teve como motivação um estudo empírico realizado em redes WLAN, onde o cenário era constituído de dois APs, que criavam um *backbone* sem fio entre si. Foram realizados dois experimentos: um com carga na rede e outro sem carga na rede.

Houve transferência de *stream* de vídeo, de um servidor de vídeo, conectado no AP 1, para o Cliente Móvel que iniciava conectado no AP 2, este cliente percorria um trajeto que se iniciava na área de cobertura do AP 2 em direção a área de cobertura do AP 1. Ao longo do trajeto o *handoff* acontecia e o Cliente passava do AP 2 ao AP 1.

Os resultados obtidos da medição foram positivos, onde até no momento do *handoff* o PSNR (*Peak Signal to Noise Ratio*) foi bom, assim como o MOS. Quando o PSNR do vídeo original era na faixa de 35, o PSNR do vídeo recebido fica em torno de 33, o que é considerado bom. Para mais detalhes consulte [59].

O resultado obtido mostrou que as redes WLAN não poderiam ser esquecidas. Como expandir a rede utilizada no experimento, assim como criar uma rede *Femtocell*, seria inviável pelo alto custo, e pelas redes LTE/*Femtocell* utilizarem frequência fechada. Decidiu-se realizar um estudo baseado em simulação.

### 5.3 *Simulador OPNET MODELER*

Como já foi discutido no capítulo 4, existem vários simuladores de redes, dentre os diversos simuladores, nesta dissertação a modelagem dos cenários de interesse utiliza o simulador comercial OPNET *Modeler 17.5* (release 8).

Como há um *know-how* (no âmbito dos laboratórios da Universidade Federal do Pará - LPRAD, LEA, LaPS e LCT) criado a partir de muitos trabalhos realizados, ao longo dos últimos anos. A aquisição realizada da licença do OPNET 17.5, a qual fornece os módulos de WLAN e LTE necessários ao estudo realizado, somado as características essenciais, as quais serão descritas neste capítulo, optou-se, assim, pela utilização do OPNET.

O OPNET acelera o processo de pesquisa e desenvolvimento permitindo a análise e concepção de redes de comunicação, dispositivos, protocolos e aplicações. É um simulador amplamente utilizado como instrumento para modelagem de redes de telecomunicações [60]. Possui um ambiente de trabalho que permite criar uma rede a partir de uma biblioteca de modelos e definir parâmetros não só ao ambiente, como também de cada objeto que a compõe, e os impactos de suas variações.

No âmbito educacional sua utilização é garantida, pois uma de suas grandes vantagens é a interface gráfica fornecida ao usuário para configurar cenários além da possibilidade didática de visualizar resultados. Observa-se que todos os resultados, topologia, configuração e simulação podem ser apresentados de forma intuitiva [9].

Os parâmetros também podem ser ajustados e os experimentos podem ser repetidos facilmente, a partir de operações triviais na GUI (*Graphical User Interface*), que nada mais é do que um ambiente com todos os parâmetros que se julgue necessário para a realização de cada uma das simulações.

O OPNET tem três funções principais: modelagem, simulação e análise. Para a modelagem, proporciona ambiente gráfico intuitivo para criar todos os tipos de modelos de redes e protocolos.

Além de simulação de eventos discretos, o OPNET *Modeler* oferece duas outras tecnologias de simulação que exigem menos detalhes do que o oferecido por meio da simulação de eventos discretos. A análise de fluxo que oferece modelagem analítica completa, útil para simulações interativas utilizadas em *design* de rede e análise de falhas, fornece o tempo de execução mais rápido em relação a outras abordagens, e escalas para suportar grandes redes e volumes de tráfego. A outra diz respeito à simulação híbrida, onde é oferecida

uma combinação de modelagem de tráfego discreto e analítico para simulações altamente detalhadas.

Por fim, para a análise, os dados e resultados da simulação podem ser exibidos de forma facilitada por uma ferramenta integrada a partir de gráficos e relatórios condensados [9].

De acordo com [61] dentre as diversas características deste simulador, podem ser destacadas:

- Simulação rápida de eventos discretos
- Biblioteca de componentes com código fonte
- Modelagem orientada a objetos
- Ambiente de modelagem hierárquica
- Suporte a simulações escaláveis
- 32-bit e 64-bit interface gráfica do usuário
- Modelagem sem fio personalizada
- Eventos discretos, híbridos e simulação analítica.
- Simulação de kernel de 32 bits e de 64 bits em paralelo
- Suporte à computação de alto desempenho
- Depuração e análise baseada em GUI
- Interface aberta para a integração de bibliotecas de componentes externos.

Diante do exposto, a utilização deste simulador se deu em razão da existência dos módulos WLAN e LTE, da facilidade em manusear seus componentes e na exportação de seus dados para o devido tratamento, já que o mesmo possui uma interface gráfica que torna o trabalho mais produtivo e, de certa forma, mais aprazível.

#### **5.4 Metodologia de Simulação Proposta**

Para execução deste estudo foi necessário elaborar uma metodologia, de forma que a modelagem fosse o mais igualitária possível, na realização dos dois cenários de simulação propostos e também na obtenção de resultados coerentes com os cenários simulados. A metodologia seguida neste trabalho foi basicamente e resumidamente esta:

- Definição dos objetivos e limites dos sistemas;
- Definição dos cenários, os quais fossem o mais igualitária possível, para que a comparação fosse justa;
- Escolhas das métricas;
- Configurações dos parâmetros e atributos dos nós das redes e dos usuários;



- Coleta de Resultados;
- Análise e interpretação dos Resultados;
- Apresentação dos Resultados.

Esses passos serão explorados com mais detalhes nos tópicos seguintes.

## 5.5 Cenários das Redes

As Figuras 17 e 18 mostram as topologias das redes estudadas nesta dissertação. No cenário WLAN temos 4 rádios, os quais possuem, cada um, uma interface AP, a qual se comunica com os usuários, e uma interface que se comunica, com o rádio *Gateway* da rede, formando assim um *Backbone Wireless*. Enquanto no cenário *Femtocell*, tem-se 4 *Femtocells* do tipo aberta, ligadas ao *backhaul* da rede de maneira infraestruturada.

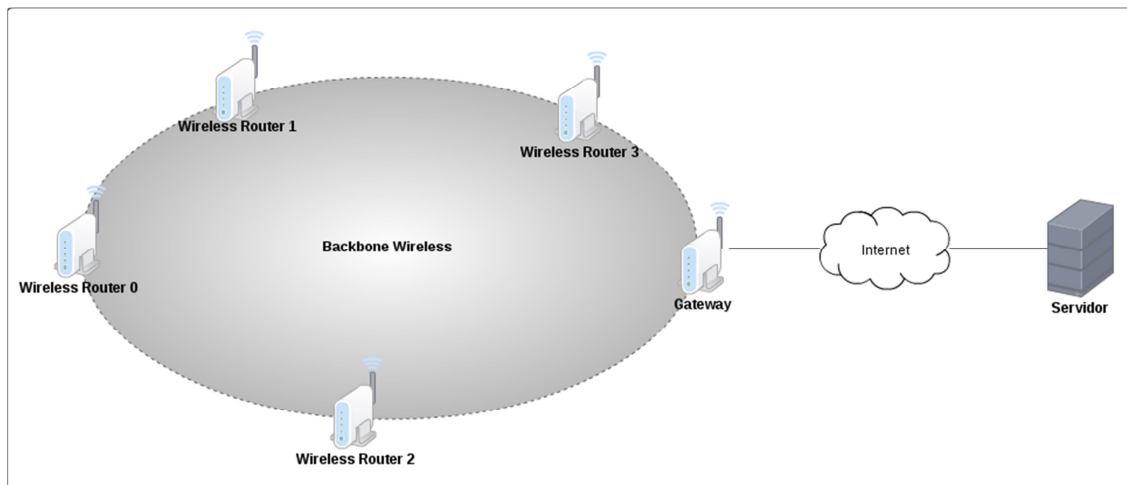


Figura 17 Topologia da rede WLAN

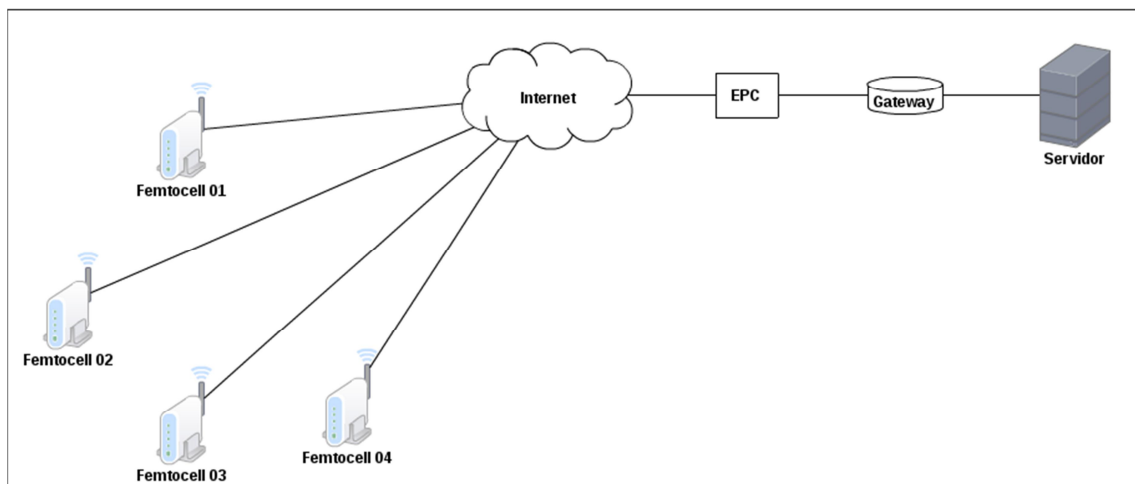


Figura 18 Topologia da rede *Femtocell*

As Figuras 19 e 20 mostram o cenário construído no OPNET. As redes possuem cada uma 29 usuários móveis, os quais estão habilitados para fazer *handover/roaming* na rede e foram distribuídos de maneira não uniforme, entre as células.

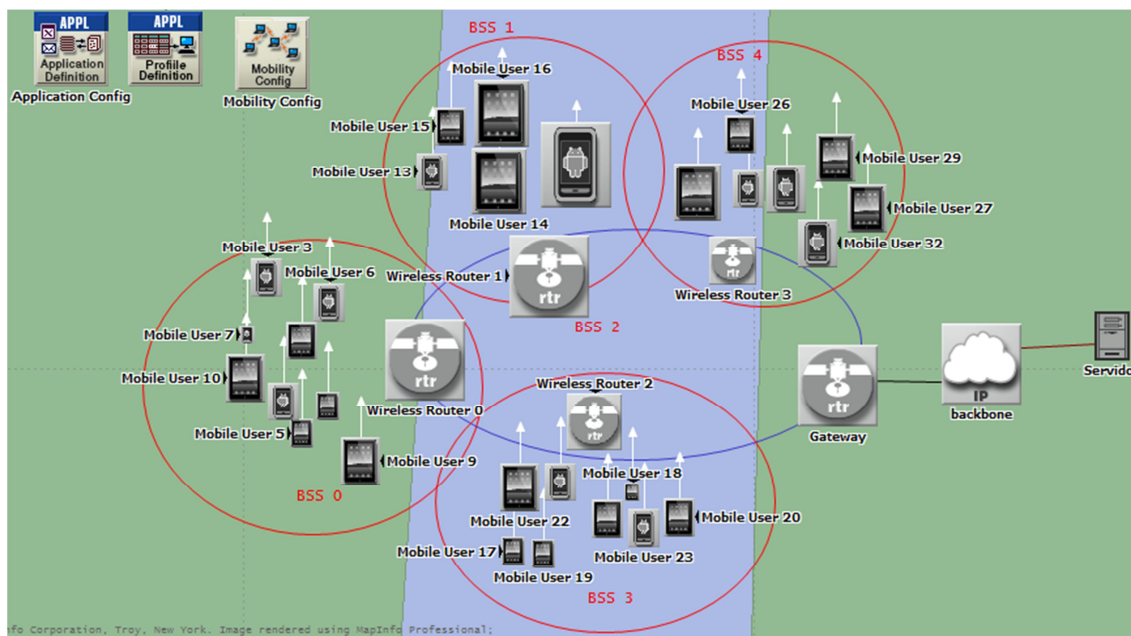


Figura 19 Cenário WLAN OPNET

A configuração dos componentes de redes será demonstrada nas tabelas a seguir:

Tabela 2 – Configuração rede WLAN Interface AP [62][63]

Parâmetros Rádio WLAN Interface AP	Valores
Função Ponto de Acesso	Habilitado
Característica Física	802.11 g
Taxa de Dados	36 Mbps
Potência	7 dBm
Limiar de potência recepção	-95

Tabela 3 – Configuração rede WLAN Interface Backbone [64][65]

Parâmetros Rádio WLAN Interface Backbone	Valores
Função Ponto de Acesso	Desabilitado
Característica Física	OFDM
Taxa de Dados	54 Mbps
Potência	7 dBm
Limiar de potência recepção	-95

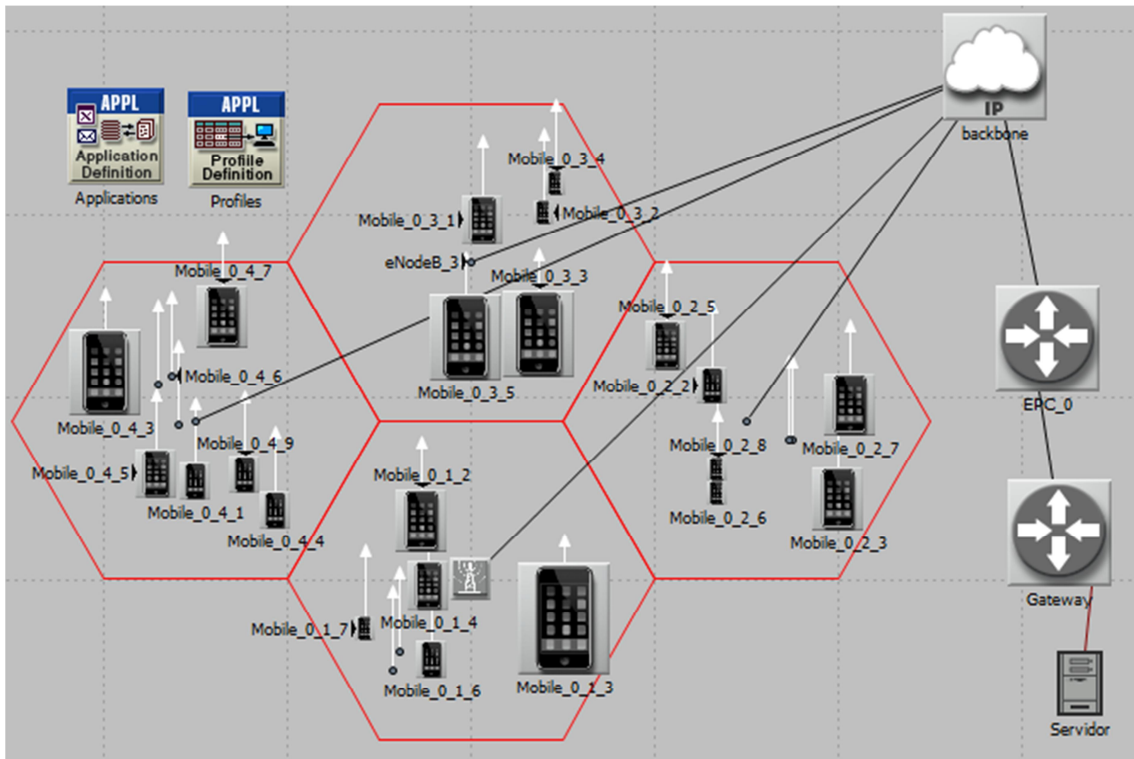


Figura 20 Cenário Femtocell OPNET

As configurações dos parâmetros das *Femtocells* serão apresentadas na tabela a seguir:

Tabela 4 – Configuração rede *Femtocell* adaptado [61][9]

Parâmetros <i>Femtocell</i>	Valores
Potencia	3dBm
Ganho da Antena	15 dBi
Altura de Antena	1m
Modelo de propagação	<i>Indoor Environment</i>

## 5.6 Configurações do Fluxo

Para geração de tráfego na rede, fez-se uso de aplicação multimídia: VoIP e Videoconferência. Esta aplicação foi escolhida pelo amplo perfil de utilização, por exigirem rígidos requisitos de qualidade de serviço (QoS) e qualidade de experiência (QoE). Através disso ocorre mais rapidamente a saturação da rede.

Todos os usuários foram configurados para aplicação multimídia, todos se comunicavam com o servidor da rede. Na Tabela 4 e 5, listamos os parâmetros mais relevantes definidos a partir do próprio padrão do simulador para a configuração da aplicação.

**Tabela 5 – Configuração Aplicação VoIP**

<b>Parâmetro VoIP</b>	<b>Valor</b>
<i>Silence Length (sec)</i>	<i>Exponentially (0.65)</i>
<i>Talk Spurt Length (sec)</i>	<i>Exponentially (0.352)</i>
<i>Encoder Scheme</i>	<i>G.711 (silence)</i>
<i>Voice Frames per Packet</i>	1
<i>Type of Service</i>	<i>Best effort (0)</i>
<i>(De) Compression Delay</i>	0.02

**Tabela 6 – Configuração Aplicação Videoconferência**

<b>Parâmetro Videoconferência</b>	<b>Valor</b>
<i>Frame Interarrival Time Information</i>	<i>10 frames/sec</i>
<i>Frame Size Information (bytes)</i>	<i>128x120 pixels</i>
<i>Type of Service</i>	<i>Best effort (0)</i>

### **5.7 Definição de Mobilidade**

Quanto à mobilidade, assumiu-se para todos os 29 usuários da rede o modelo *random waypoint*. O modelo de mobilidade é um fator de grande relevância e possui grande influência no projeto e desempenho da rede.

O modelo *Random Waypoint* faz com que o nó móvel permaneça parado em um ponto no ambiente de simulação durante um determinado período. Uma vez transcorrido este tempo, o nó escolhe uma velocidade e posição aleatória no cenário como destino, esses valores são escolhidos de modo a serem uniformemente distribuídos entre valores predefinidos. O processo é reiniciado quando o nó chega ao ponto de destino [9].

### **5.8 Resultados**

Os resultados aqui apresentados demonstram um comparativo de um ambiente WLAN e um ambiente *Femtocell*. Foram executadas diversas instâncias de simulação, a repetição dos

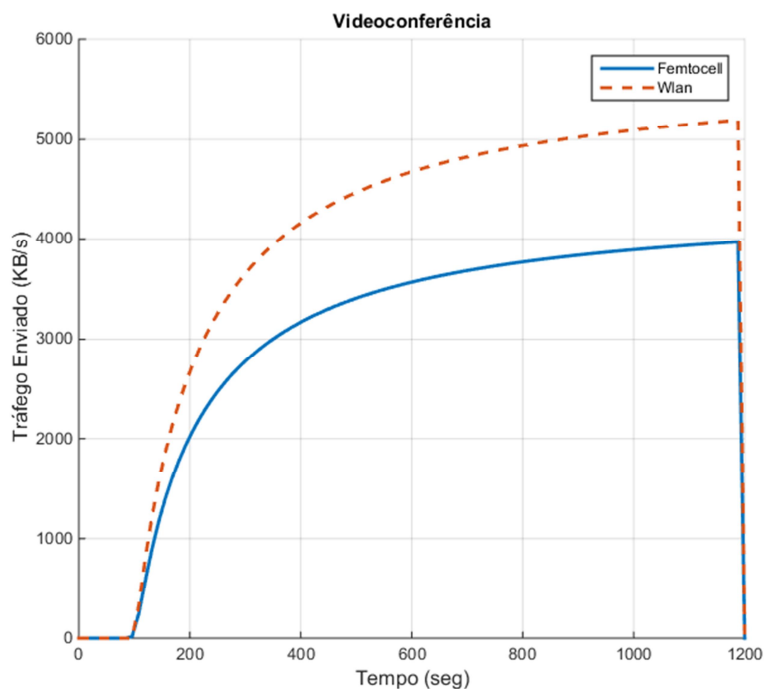
cenários ocorreu com mesma configuração, mesma duração, mesmos parâmetros de entrada, porém com semente de geração de números aleatórios diferente.

O tempo de simulação foi de 20 minutos - tempo tido como suficiente para que o ambiente apresentasse um comportamento estável. No entanto, devido ao cenário de mobilidade proposto, as simulações demandaram um tempo computacional alto, em média 6 horas para cada simulação de 20 minutos.

As métricas de QoS escolhidas foram as tradicionais: tráfego enviado e recebido, *delay*, *jitter*, MOS e perda de pacotes. Métricas essas fornecidas e coletadas do simulador.

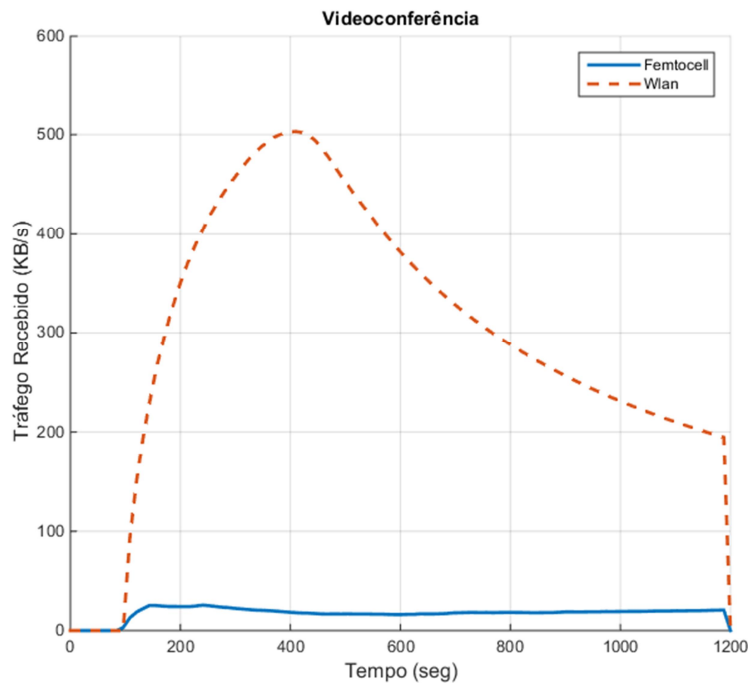
Uma análise individual também é realizada a fim de se observar o desempenho da rede pela perspectiva do usuário.

Os gráficos a seguir mostram o comportamento global das redes, através da videoconferência.



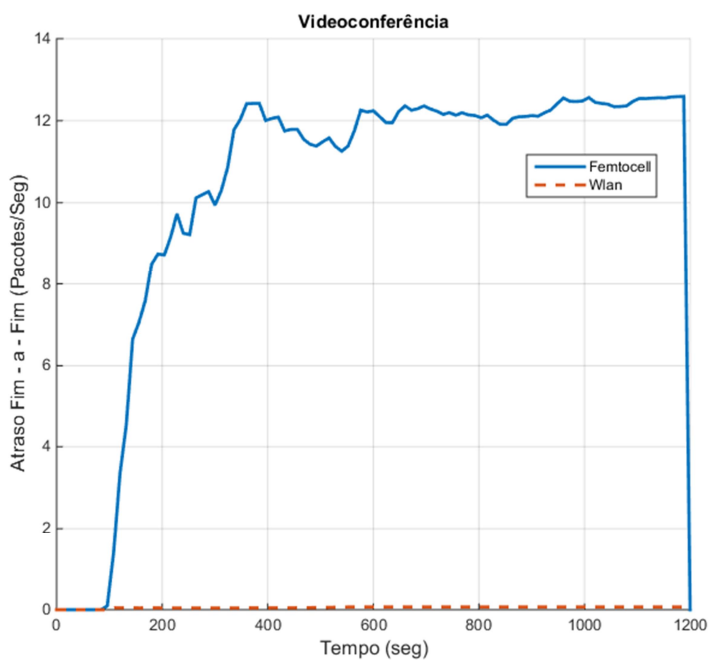
**Figura 21 Tráfego Enviado - Videoconferência**

Na Figura 21, observa-se o tráfego global enviado na rede. No gráfico o tráfego enviado em ambas as redes, inicia em torno dos 100 segundos e mantém comportamento estável e crescente, no entanto nota-se que a rede WLAN envia mais dados que a *Femtocell*, conseguindo transmitir aproximadamente 1 MB a mais de dados.



**Figura 22 Tráfego Recebido - Videoconferência**

A Figura 22 apresenta o tráfego global recebido nas redes. O recebimento de dados na WLAN inicia-se com um constante aumento, até um terço do tempo de simulação, após há uma redução, tendo o seu recebimento mínimo em 200 KB/s, em torno de 1000% a mais do que o recebimento da *Femtocell*.

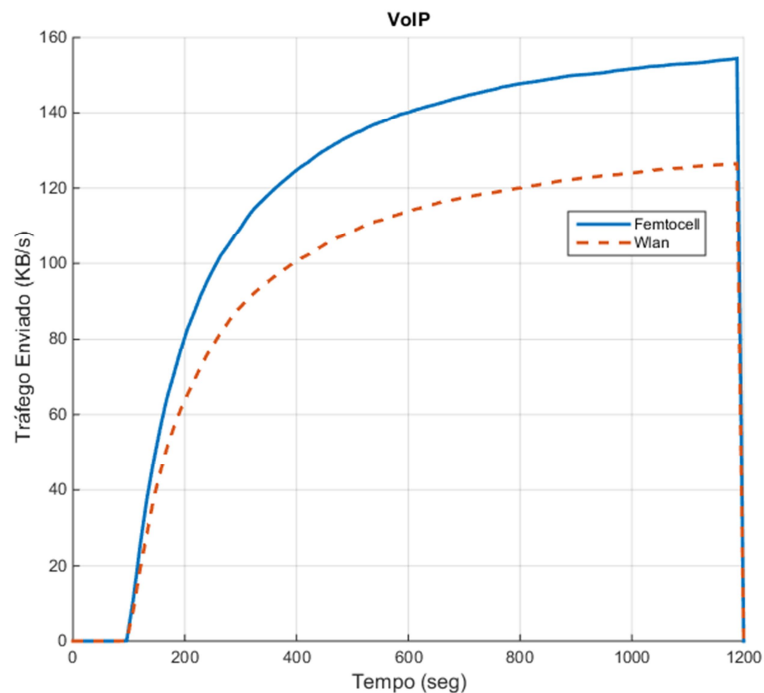


**Figura 23 Atraso fim-a-fim Videoconferência**

A Figura 23 mostra o atraso fim a fim das redes que é: A diferença de tempo entre o instante em que o transmissor envia o primeiro bit do pacote e o instante que o receptor recebe este bit. Seu comportamento é função da carga na rede.

Observa-se no gráfico uma enorme diferença de comportamento entre os dois ambientes. O *delay* fim a fim, no cenário *Femtocell* fica em torno de 8 a 12 segundos, e já na WLAN é irrisório o valor.

Os gráficos abaixo inicializam os resultados da aplicação VoIP. As Figuras 24 e 25 mostram, respectivamente, os tráfegos globais enviados e recebidos. Observa-se que o tráfego enviado e recebido da *Femtocell* é maior que o da WLAN, e em ambas, o aumento do tráfego enviado tem crescimento gradativo.



**Figura 24 Tráfego Enviado-VoIP**

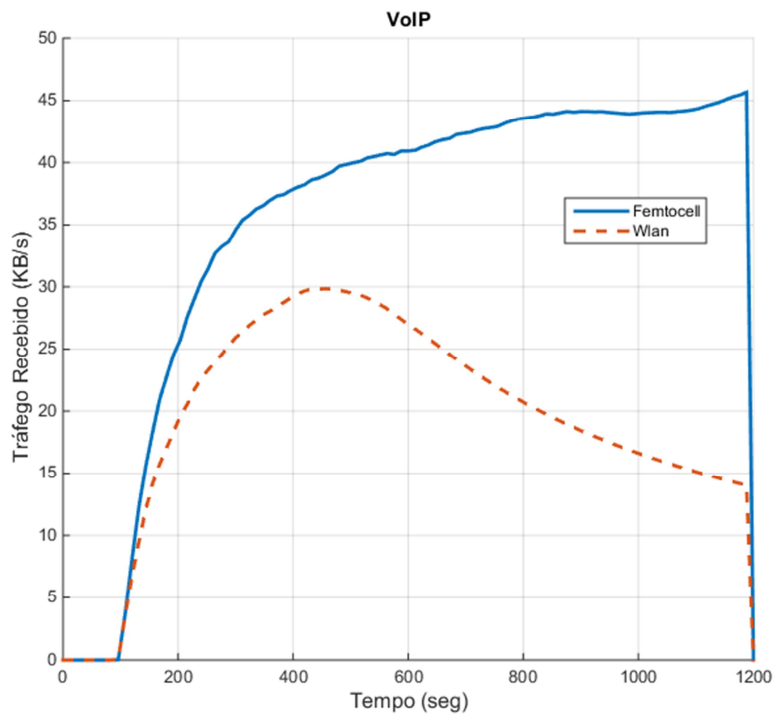


Figura 25 Tráfego Recebido - VoIP

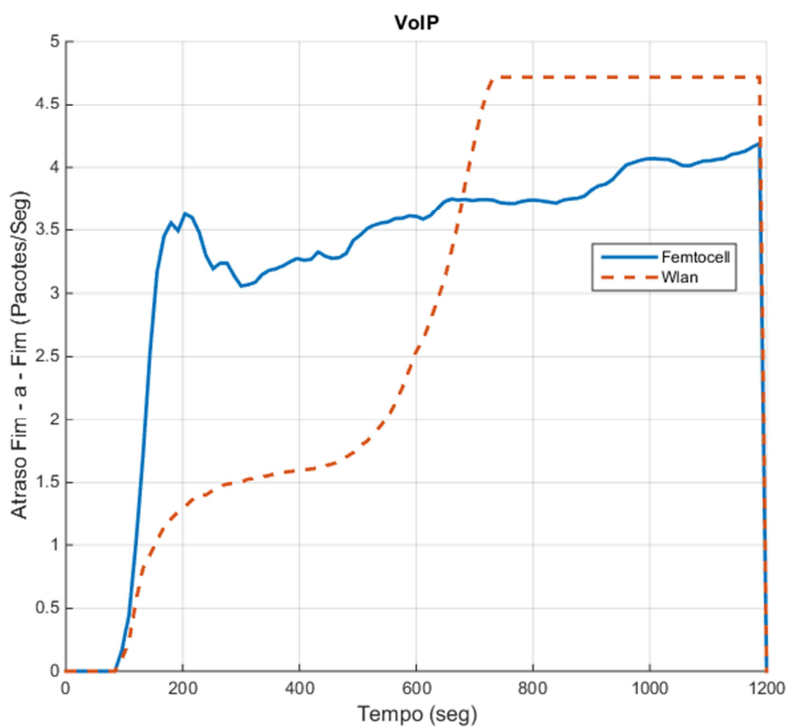
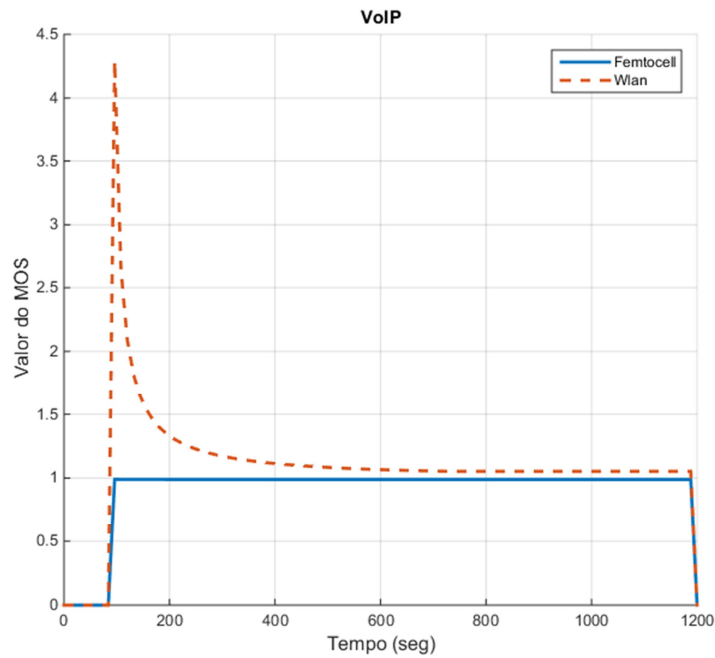


Figura 26 Atraso Fim-a-Fim VoIP

A Figura 26 apresenta o comportamento do *delay* fim-a-fim das redes. Observa-se que o atraso na WLAN é em média de 1.5 segundos, enquanto a *Femtocell* mantém-se em

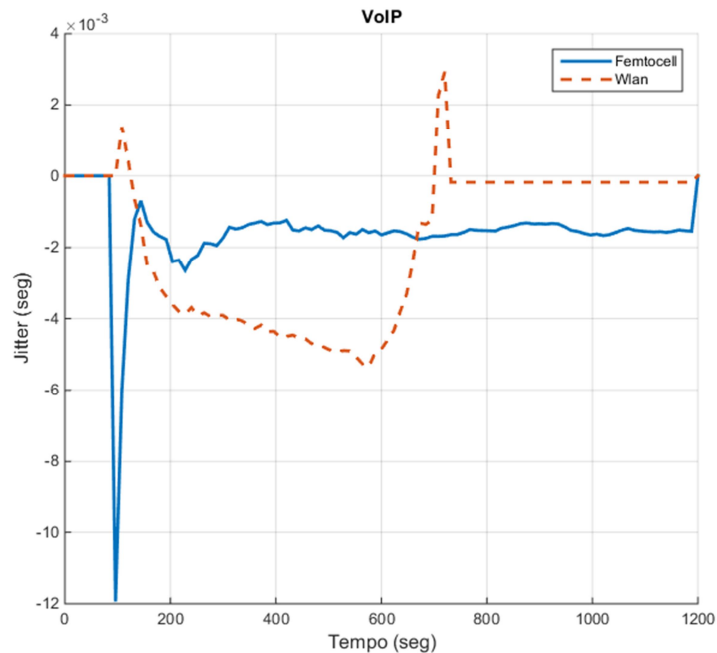


aproximadamente 3.5s até os 600 segundos de simulação. Em ambas há um aumento com o tempo, porém na WLAN esse aumento é maior.



**Figura 27 MOS - VoIP**

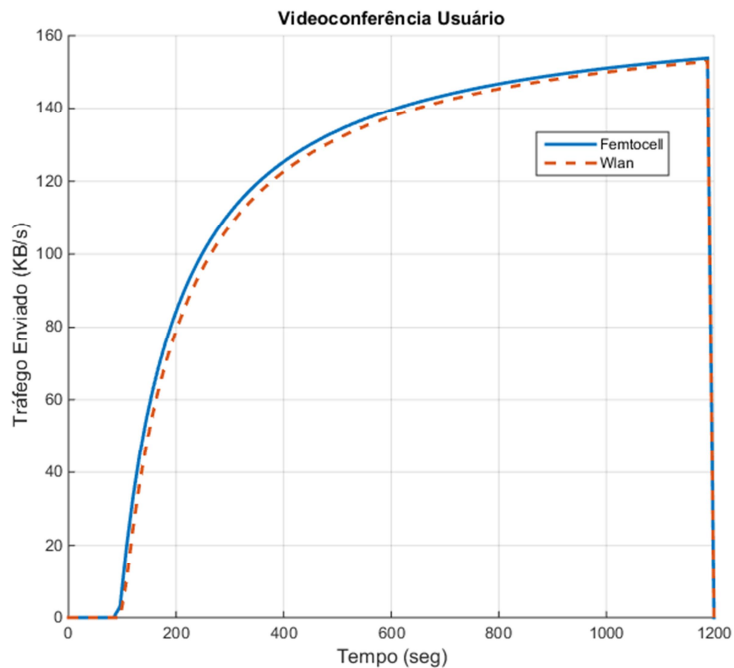
A Figura 27 mostra o valor do MOS obtido. O MOS é uma medida clássica de qualidade de voz, uma indicação numérica da qualidade subjetiva de voz, variando de 1 (qualidade baixa) a 5 (qualidade excelente). Observa-se que ambos os valores são abaixo de 2. Apesar de inicialmente a WLAN começar com um valor de 4.5, ambas mantiveram valores aproximados.



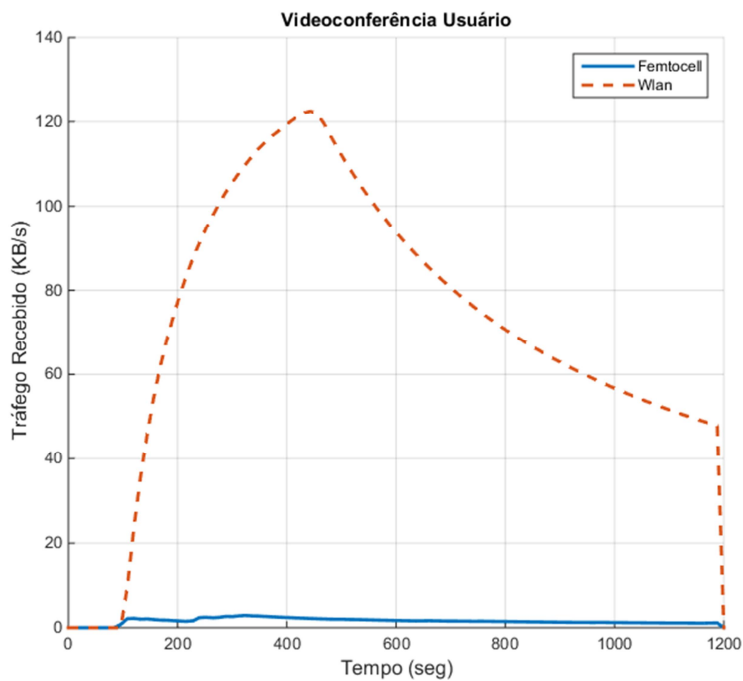
**Figura 28 Jitter VoIP**

O *jitter*, que consiste na variação do atraso de transmissão, é um dos principais fatores que causa degradação da qualidade em uma comunicação de voz sobre IP. A Figura 28 mostra que as variações de tempo da chegada do pacote de voz ao destino não excederam 2ms. Ambas as redes obtiveram valores satisfatórios.

Os resultados discutidos, até aqui, mostram o desempenho das redes de uma maneira global. No entanto, sabe-se que alguns dos parâmetros variáveis nestes cenários, incluem a velocidade do utilizador, o tipo de tráfego, a aplicação, entre outros. Nesse sentido, os usuários móveis de teste foram também observados individualmente, uma vez que cada usuário percorreu uma trajetória aleatória.

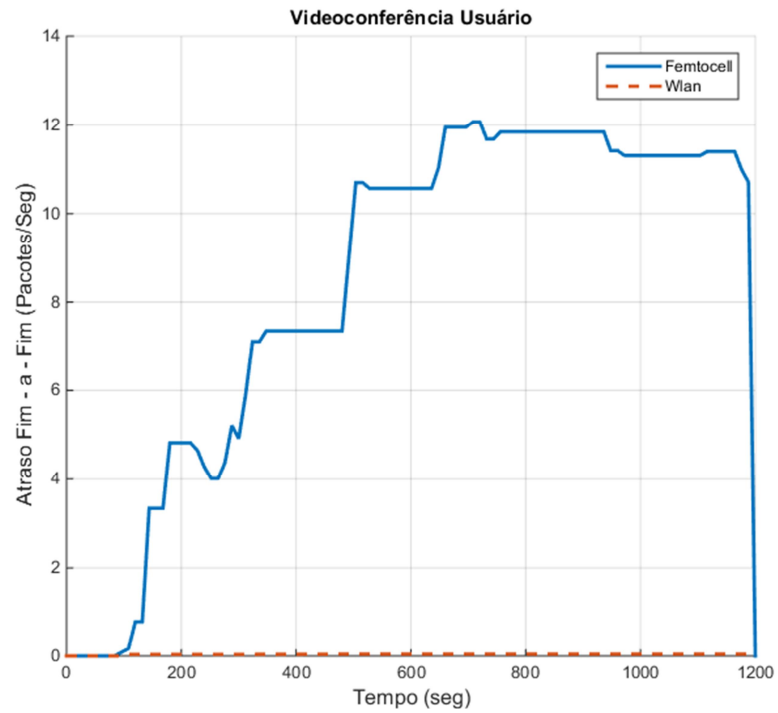


**Figura 29 Tráfego Enviado Usuário Videoconferência**



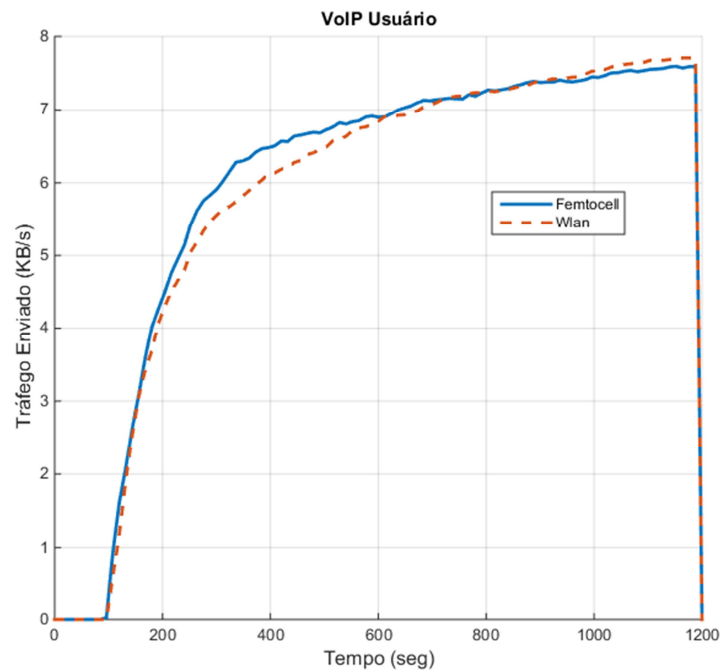
**Figura 30 Tráfego Recebido Usuário Videoconferência**

As Figuras 29 e 30 mostram os tráfegos enviados e recebidos, respectivamente. O tráfego enviado tem comportamento semelhante em ambas às redes. No entanto, ao que se refere a tráfego recebido, nota-se novamente um valor muito maior de tráfego recebido na WLAN.

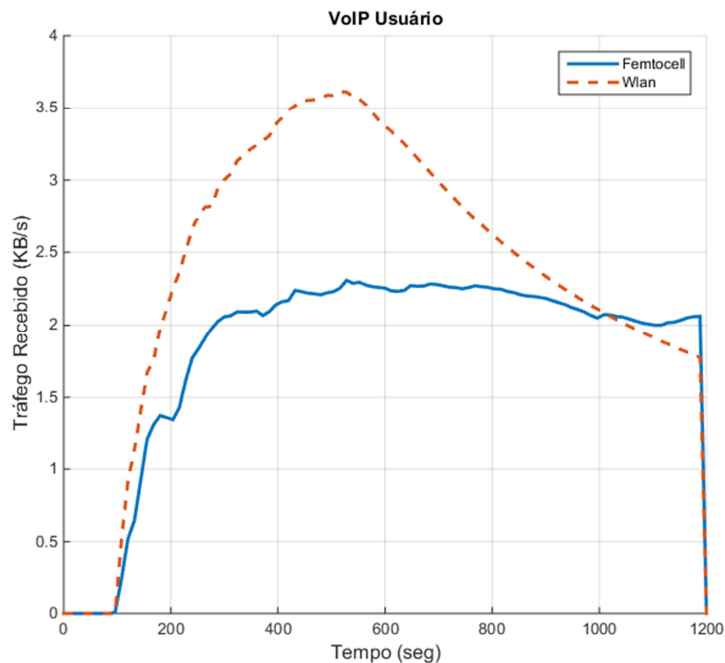


**Figura 31 Atraso Fim- a- Fim Usuário Videoconferência**

Na Figura 31 tem-se o *delay* fim a fim das redes. O *delay* da *FemtoCell* é bem maior que na *WLAN*. E há um aumento com o tempo.

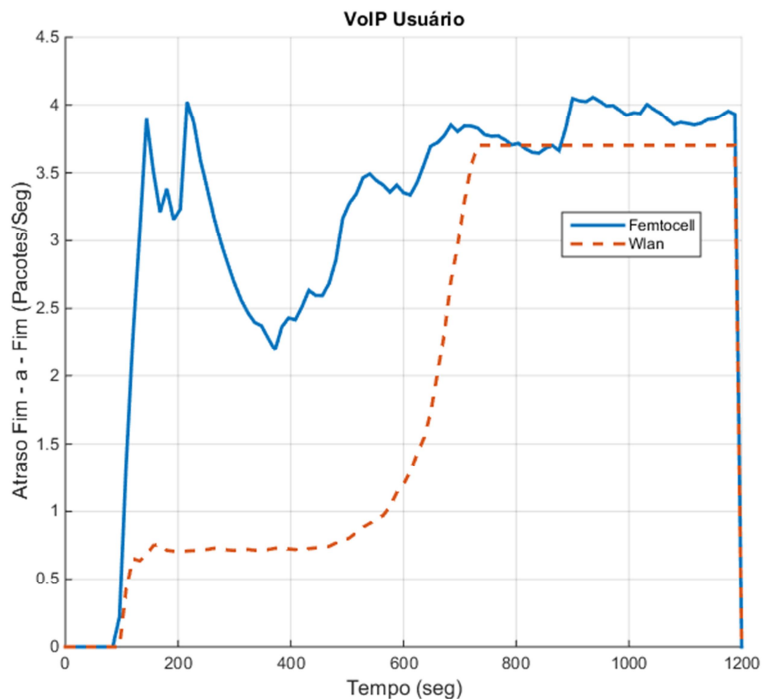


**Figura 32 Tráfego Enviado Usuário VoIP**



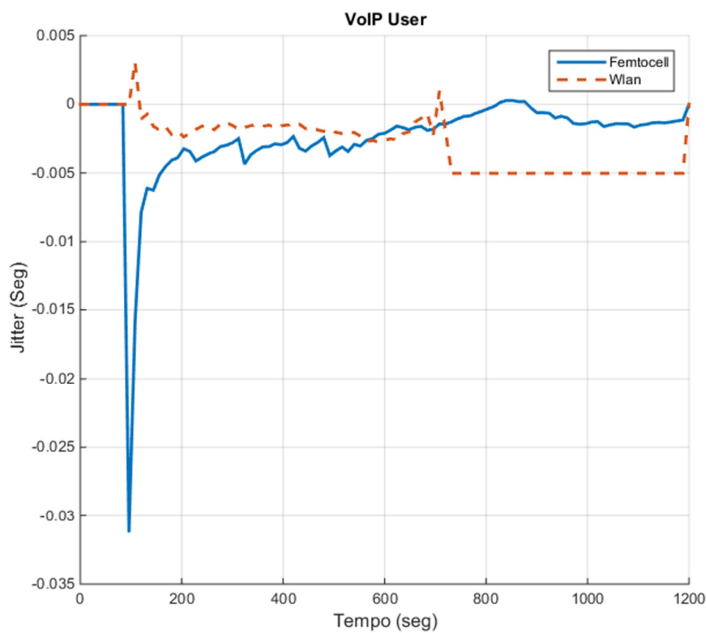
**Figura 33 Tráfego Recebido Usuário VoIP**

As Figuras 32 e 33 mostram os tráfegos enviados e recebidos das redes. O tráfego enviado é bem parecido nas duas redes. Havendo uma maior diferença no recebido no qual a WLAN tem um recebimento maior em 90% do tempo de simulação, mesmo com a redução ao longo do tempo.



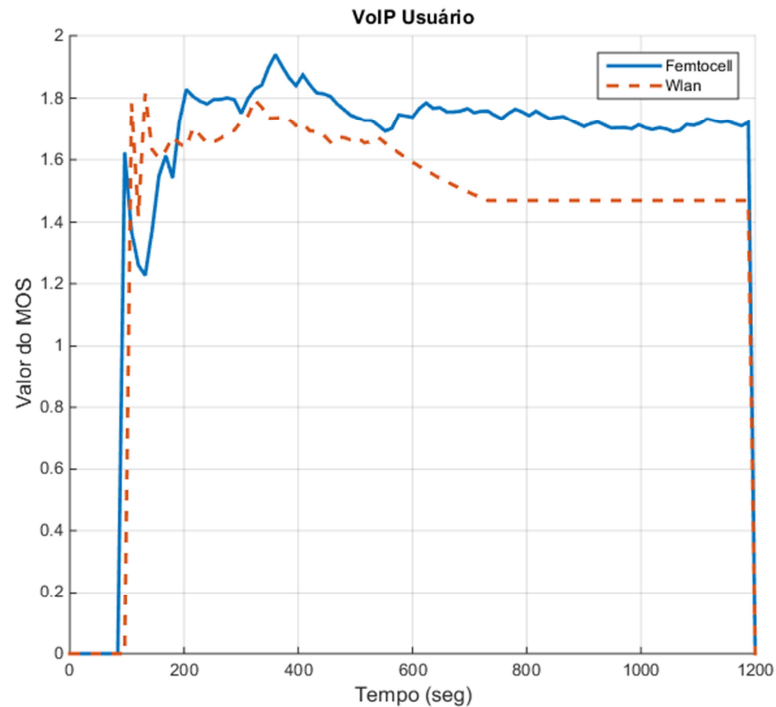
**Figura 34 Delay fim-a-fim Usuário VoIP**

Na Figura 34 mostra o *delay* fim a fim das redes. Na *Femtocell* é bem maior no que na WLAN em mais de 50% do tempo de simulação, as duas redes aumentam com o tempo.



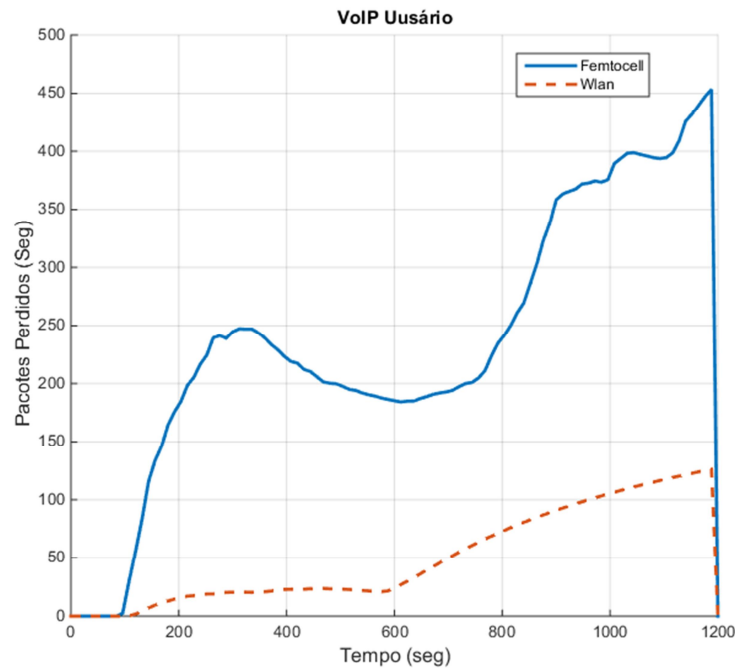
**Figura 35 Jitter Usuário VoIP**

A Figura 35 mostra o *Jitter* das redes, nas duas redes o valor fica bem próximo, sendo que na WLAN até a metade do tempo é maior, ficando menor no restante. Porém os valores são tão próximos que a diferença é irrisória.



**Figura 36 MOS Usuário VoIP**

A Figura 36 mostra os valores do MOS das redes, os quais não apresentam grande diferenças nas duas redes.



**Figura 37 Pacotes Perdidos Usuário VoIP**

A Figura 37 mostra os pacotes perdidos das redes, observa-se que na rede *Femtocell* a perda de pacotes é superior à encontrada na rede WLAN. Em ambas há um aumento dos pacotes perdidos ao longo do tempo.

Com o tempo o tráfego na rede cresce (como pode ser visto nas Figuras 21, 24, 29 e 32), causando congestionamento na rede, e conseqüentemente elevação na perda de pacotes.

No geral, observa-se que na rede WLAN, próximo à metade do tempo de simulação, há uma queda no desempenho da rede. Isso pode ter sido ocasionado pelo congestionamento, dado o volume de dados trafegados na rede. Em [31] foi observado que as redes WLAN apresentam um baixo isolamento entre unidades móveis, ou seja, a transmissão de multimídia para uma unidade móvel pode afetar negativamente a transmissão para todas as unidades móveis atendidas por um ponto de acesso.

Como foi visto no capítulo 2, nas redes WLAN, quando os usuários se afastam do rádio, as placas reduzem a velocidade de transmissão como alternativa para manter a estabilidade do sinal. Ou seja, ao decorrer da simulação, devido à mobilidade dos usuários, a taxa de transmissão foi diminuindo, e o tráfego enviado aumentou, contribuindo para o congestionamento da rede.

A rede *Femtocell* teve um desempenho menor. Dentre as possíveis explicações, tem-se a interferência, um dos principais problemas desta rede, como já foi comentado ao longo



dessa dissertação. Como o objeto era simular o ambiente indoor, a distância entre as *Femtocells* pode ter contribuído para que a interferência fosse maior.

Associado a isso se tem o grande volume de tráfego que a aplicação multimídia produz que contribui para uma maior interferência. E a interferência é um problema que está intimamente ligado com o desempenho da rede. Somada a esta também se tem o congestionamento que a rede sofre ao longo do tempo. Uma vez que as redes foram sobrecarregadas, ao máximo, dado ao grande número de usuário.

## **5.9 Considerações Finais**

Neste capítulo detalhou-se a metodologia, as configurações dos nós das redes, a configuração dos fluxos da aplicação e os cenários de estudo. Após as simulações realizadas, os dados obtidos foram tratados, para composição dos gráficos utilizados no estudo comparativo aqui descrito. Por fim, as métricas de QoS foram analisadas.

Com as análises preliminares obtidas percebe-se que a utilização das *Femtocells* pode não ser tão vantajosa. Os resultados reforçam a necessidade de se mitigar aspectos como a degradação do desempenho resultante da interferência entre *Macrocell* e *Femtocells* e entre *Femtocells*, quando as implantações forem densas e sem planejamento. Sem esse estudo e controle, a implantação em massa torna-se inviável, ocasionando prejuízos quanto aos indicadores de QoS.

Por outro lado, viu-se que a rede WLAN apresentou um bom desempenho na maioria das métricas utilizadas. Com isso demonstrou que suporta melhor o grande volume de tráfego e usuário.

Por fim, ressalta-se que tal estudo não possui pretensão de ser conclusivo e nem provar que as *Femtocells* não podem ser usadas, mas sim inserir outros parâmetros na discussão, importante e contemporânea, do uso indiscriminado de *Femtocells* como alternativas ao sistema celular tradicional. Assim como chamar a atenção a redes WLAN, muito utilizadas e que possuem um legado grande de infraestrutura o qual não pode ser simplesmente esquecido.

## 6 CONCLUSÃO

Devido à mudança no perfil dos usuários o crescimento de dados móveis tem tido um crescimento constante e exponencial. Com isso o congestionamento das redes celulares é inevitável. Fatos como esses obrigam as operadoras a pensarem em alternativas para aliviar/descarregar o fluxo de dados das redes celulares.

Basicamente, duas tecnologias têm sido promissoras: a *Femtocell* e a WLAN. Muitos trabalhos sobre o uso de *Femtocell* têm sido feitos, e ela tem sido visto como a panaceia do momento.

Porém, o uso da WLAN ainda é muito forte e, além disso, há um legado muito grande da infraestrutura WLAN. Em 2013, havia mais de 98 milhões de APs espalhados no mundo. Não se pode simplesmente descartar essa infraestrutura e gastar milhões em investimentos na infraestrutura da *Femtocell*. Precisa-se de soluções com o melhor custo/benefício.

Em virtude dessa problemática, esta dissertação, se propôs a estudar essas duas tecnologias, fazendo uma abordagem comparativa entre elas. Tentou-se reproduzir ao máximo o ambiente real, utilizando-se de aplicação multimídia, mobilidade, e grande número de usuários.

Esta dissertação apresentou um levantamento do estado da arte das áreas envolvidas na pesquisa, a partir de buscas realizadas em periódicos, conferências e em grupos de pesquisa/instituições de referência. Por conseguinte, realizou-se um resumo acerca das diversas técnicas e ferramentas de avaliação de desempenho (aferição, solução por modelagem analítica e por simulação), compreendendo também questões relevantes relacionadas à qualidade de serviço, para posterior criação do cenário para simulação, assim como suas análises.

O trabalho se conclui com um questionamento em aberto: até que ponto a solução de *Femtocells* é de fato aplicável e plenamente eficaz? Existem ainda diversas outras questões a serem analisadas para garantir que o uso dessa tecnologia possui uma relação custo/benefício favorável.

E será mesmo que as WLAN devem ser esquecidas, ou mais, será que há necessidade de se gastar milhões em investimentos na infraestrutura da *Femtocell*? Será que não é mais viável a utilização da WLAN para o descarregamento do tráfego de dados das redes celulares, por exemplo? Ou será que um cenário no qual *Femtocell* e WLAN trabalhe junto não seria a solução mais promissora, ao invés de ser fazer uma instalação densa de *Femtocell*?

O estudo de caso realizado apresenta resultados preliminares. Nos quais para os parâmetros e cenários propostos, as redes WLAN tiveram um melhor desempenho. Suportaram melhor o grande tráfego multimídia e o grande número de usuários móveis.

## 6.1 Contribuições da Dissertação

Como principais contribuições desta dissertação, destacam-se:

- A proposta de uma metodologia para o estudo de avaliação para cenários de tecnologia WLAN e *Femtocell*, podendo ser generalizada para diversos outros problemas do mundo real que possam ser modelados e resolvidos por simulação.
- A metodologia proposta comporta-se de forma flexível, podendo incorporar um conjunto de outras variáveis aleatórias, de acordo com a função densidade ou estudo de interesse, permitindo a geração de inúmeros cenários de simulação.
- Por intermédio da utilização das métricas de QoS obtidas, foi possível realizar um estudo da utilização de *Femtocell* s e WLAN, avaliando contrapontos, vantagens e desvantagens que as *Femtocell* s e WLAN possam ter dentro de um cenário de mobilidade e grande fluxo de dados.
- A investigação de estratégias que garantam suporte ao crescente tráfego móvel, contribuindo principalmente na discussão da efetividade da utilização de *Femtocell* s, como solução.
- O estímulo ao questionamento da real necessidade de se prover toda uma infraestrutura *Femtocell* ao invés de se fazer o aproveitamento e adaptação das infraestruturas já existente das WLANs.
- A divulgação do trabalho por meio de publicação de artigos em conferência internacional, onde são apresentadas a proposta e as abordagens dos cenários do estudo de caso desta dissertação. Este artigo foi aceito e publicado em:
  - CASTILHO, J. J. M., MORAES, M. S, LOPES, R. L. F, CARVALHO, A. A. P, PINHEIRO, M. P, ARAUJO, J. P. L, FRANCÊS, C. R. L. *Have WLAN networks outgrown their usefulness? A viability study of WLAN Networks in DenseNets: an analysis based on QoS/QoE and handover.* The Proceedings of the International Conference on Digital Information Processing, Data Mining, and Wireless Communications, Dubai, UAE, Janeiro de 2015.
  - CASTILHO, J. J. M., MORAES, M. S, LOPES, R. L. F, ARAUJO, J. P. L, FRANCÊS, C. R. L. *Have WLAN networks outgrown their*

*usefulness? A viability study of WLAN Networks in DenseNets: an analysis based on QoS/QoE and handover.* Aceito para publicação no COSIT: *Second International Conference on Computer Science and Information Technology*, Genebra, Suíça, Março 2015.

- CASTILHO, J. J. M., MORAES, M. S, LOPES, R. L. F, ARAUJO, J. P. L, FRANCÊS, C. R. L. *A Strategy for Mesh Networks Performance Evaluation Considering Handoff: A Measurement Based Approach.* Aceito para publicação no CTRQ: *The Eighth International Conference on Communication Theory, Reliability, and Quality of Service*, Barcelona, Espanha, Abril 2015.

## **6.2 Trabalhos Futuros**

Como possíveis desdobramentos deste trabalho seria de grande relevância um cenário heterogêneo, no qual WLAN e *Femtocell* pudessem operar juntas e o seu desempenho fosse analisado.

Pesquisas quanto as implicações do crescimento desordenado de *Femtocells* é outra sugestão. Como não há uma política de gestão eficiente para implementações *Femtocells*, em grande escala, a avaliação do controle da gestão dos recursos rádio dos HNBs é um fator importante quando colocado num ambiente com elevado número de utilizadores. Qual o número de *Femtocells* que a rede suporta de forma a não impactar na qualidade de serviço? A interferência gerada será minimizada ao ponto de garantir, de fato, melhor cobertura e taxas de dados?

## REFERÊNCIAS

- [1] CISCO. *Cisco Visual Networking Index prevê que o tráfego global de dados móveis crescerá 13 vezes até 2017*. Disponível em: <<http://globalnewsroom.cisco.com/pt/br/release/Cisco-Visual-Networking-Index-preve-que-o-tr%C3%A1fego-global-de-dados-m%C3%B3veis-crescer%C3%A1-13-1688805>>. Acesso em: 10 jun. 2015.
- [2] JUNIOR A., A. *Crescimento das redes sem fio sinaliza começo da "década da mobilidade"*. Disponível em: <<http://www.correiobrasiliense.com.br/app/noticia/tecnologia/2011>>. Acesso em: 15 jun. 2015.
- [3] CISCO. *Tráfego global de dados móveis crescerá 11 vezes entre 2013 e 2018 segundo o Relatório Cisco VNI*. Disponível em: <<http://www.cisco.com/web/PT/press/articles/2014/20140205.html>>. Acesso em: 15 jun. 2015.
- [4] COMSCORE. *IMS Mobile in Latam Janeiro 2015*. Disponível em: <<http://www.imscore.com/news/Estudios-comScore/IMS-Mobile-Study-Janeiro2015.pdf>> Acesso em 15 jun. 2015.
- [5] INTERNATIONAL WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING CONFERENCE. 7., 2011, Istambul. *A simulation based study of Mobile Femtocell assisted LTE networks*. p. 2198-2203, jul. 2011.
- [6] INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS COMMUNICATIONS, VEHICULAR TECHNOLOGY, INFORMATION THEORY AND AEROSPACE & ELECTRONIC SYSTEMS. 4., 2014, Aalborg. *A Comparison Model for the Wireless Local Area Network Technologies: 802.11n and HeNB in LTE Networks*. Maio 2014.
- [7] PROCEEDINGS OF THE FEMTOCELLS EUROPE CONFERENCE. 2008, Londres. *Femtocells in the US market-business drivers and consumer propositions*. 2008.
- [8] IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY MAGAZINE. 2014. "5G Network Capacity: key elements and technologies". V9, p. 71-78. 2014.
- [9] SILVA, Ketyllen da Costa. *Análise de Handover a partir do uso de Femtocells em Redes LTE: abordagem baseada em simulação discreta*. Belém, PA: UFPA, 2014. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pará, 2014.
- [10] XIA, Ping; CHANDRASEKHAR, Vikram.; ANDREWS Jeffrey. G. IEEE Trans. Wireless Commun. *Open vs. closed access femtocells in the uplink.*, v. 9, n. 12, p. 3798–3809. 2010.
- [11] HASAN, Syed Faraz; SIDDIQUE, Nazmul Haq; CHAKRABORTY, Shyam., *"Femtocell versus WiFi - A survey and comparison of architecture and performance"*, Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology, 2009. 1st International Conference on. p. 916-920, maio, 2009.
- [12] J. Publisher, *Wifi and femtocell integration strategies 2011-2015*, mar., 2011. Disponível em: <<http://www.juniperresearch.com/>>. Acesso em: 20 maio 2015.

- [13] TELECO. Hot-spots Wi-Fi no Brasil - Anatel. Disponível em: < <http://www.teleco.com.br/wifi.asp>>. Acesso em: 16 jun. 2015.
- [14] IPASS. iPass Mobile Network. Disponível em: < <http://www.ipass.com/mobile-network/>> Acesso em: 20 de jun. de 2015.
- [15] TELECO. Femtocell: Características Principais. 2009. Disponível em: <[http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialfemto/pagina\\_2.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialfemto/pagina_2.asp)>. Acesso em: 25 jun. 2015.
- [16] MAIER M.; VERIKOUKIS C. “*Inside Smart FiWi-HetNets and the Explosion of Mobile Data Traffic*”, International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2014. Graz. p 1-4.
- [17] OI. Oi WiFi. Disponível em: < <http://www.oi.com.br/oi/oi-para-voce/planos-servicos/internet/servicos/rede-oi-wifi>> Acesso em: 20 jun. 2015.
- [18] LEUNG V. C. M. *Internetworking wireless terminals to local area networks via radio bridges*. IEEE International Conference on Selected Topics in Wireless Communication. p. 126-129, 1992.
- [19] FIGUEIREDO C. M. S.; NAKAMURA E. Computação Móvel: Novas Oportunidades e Novos Desafios. *T&C Amazônia*, v. 1, n. 2, jun. 2003.
- [20] GARCIA L. G. U. *Redes locais sem fio que atendem ao padrão IEEE 802.11*. Disponível em:< [http://www.gta.ufrj.br/grad/01\\_2/802-mac/](http://www.gta.ufrj.br/grad/01_2/802-mac/)>. Acesso em: 28 jun. 2015.
- [21] BAUER M. Redes sem fio Mesh: Padrao 802.11s. Sao José – SC outubro / 2012
- [22] SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS. 6. 2008, RJ. *Multihop MAC: Desvendando o Padrão 802.11s*. RJ, 2008.
- [23] SILVA, R. F. D. Análise de segurança de redes sem fio na cidade de Natal/RN. 2012. Trabalho de conclusão de Curso (Monografia) - Instituto Federal de Educação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), Natal, 2012.
- [24] KUROSE, J. F.; ROSSE, K. W. Redes de Computadores e a Internet: uma Abordagem top-down. 3. ed. Addison Wesley, 2006.
- [25] *Pontos de Presença da RNP- RS*. Disponível em: < <http://www.pop-rs.rnp.br>>. Acessado em: 10 jun. 2015.
- [26] SCHILLER, J., *Mobile Communications*, Addison-Wesley, 2003.
- [27] MORIMOTO, C. E. *Redes wireless, parte 1: uma introdução*. 2008a. Disponível em: < <http://www.hardware.com.br/tutoriais/redes-wireless/pagina4.html> >. Acesso em: 19 jun. 2015.
- [28] SOUZA F. S. Análise, Implementação, Site Survey e Gerenciamento da Rede Sem Fio Outdoor no Projeto UFPA 2.0. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). Universidade Federal do Pará. Pará, 2013.

- [29] GAST, Matthew; 802.11 wireless networks: the definitive guide, Definitive Guide Séries, 2ª Edição; O ‘Reilly Media, Inc.,2005.
- [30] MARIA M., AGUIAR P. N. P., LUZ K. S. *Análise das metas de desempenho das versões B, G e N dos padrões 802.11.* Disponível em: <[http://www.istrio.net/revista/artigos/01/4analise\\_das\\_metas\\_de\\_desempenho\\_das\\_versoes\\_b\\_g\\_e\\_n\\_do\\_padrao\\_ieee\\_80211.pdf](http://www.istrio.net/revista/artigos/01/4analise_das_metas_de_desempenho_das_versoes_b_g_e_n_do_padrao_ieee_80211.pdf)>. Acesso em: 05 jun. 2015.
- [31] CONCEIÇÃO, A., F. *Voz e vídeo sobre redes sem Fio IEEE 802.11.* 2006. Tese (Doutorado em Ciência da Computação). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- [32] TELECO – Inteligência em Telecomunicações. Disponível em: <[http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutoriallte/pagina\\_2.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutoriallte/pagina_2.asp)>. Acesso em: 05 jun. 2015.
- [33] GUEDES, L. C. S.; VASCONCELOS, R. R. *UMTS, HSPA e LTE.* Disponível em: <[http://www.gta.ufrj.br/grad/09\\_1/versao-final/umts/lte.html](http://www.gta.ufrj.br/grad/09_1/versao-final/umts/lte.html)>. Acesso em: 05 jun. 2015.
- [34] KOROWAJCZUK, L. *LTE, WiMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis.* Wiley, 2011.
- [35] TELECO. *Tecnologias de Celular.* 2012. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/tecnocel.asp>>. Acesso em: 14 jun. 2015.
- [36] 3GPP TS 36.214 V8.2.0 (2008-03), *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA).* Physical Layer-Measurements (Release 8). 2008.
- [37] BĂLAN, I. M., et al. An enhanced weighted performance-based handover parameter optimization algorithm for LTE networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, n. 1, p. 1. 2011.
- [38] 4G AMÉRICAS. *Inside 3GPP Release 12: Understanding the Standards for HSPA+ and LTE-Advanced Enhancements.* White Paper, 2014. Disponível em: <[http://www.4gamericas.org/documents/Executive%20Summary\\_3GPP%20Release%2012\\_FINAL%283%29%20%282%29.pdf](http://www.4gamericas.org/documents/Executive%20Summary_3GPP%20Release%2012_FINAL%283%29%20%282%29.pdf)>. Acesso em: 12 jun. 2015.
- [39] ZHANG, J.; ROCHE, G.L. *Femtocells Technologies and Deployment.* Wiley, 2010.
- [40] FUTURECOM. Femtocell para iniciantes. Disponível em: <<http://www.futurecom.com.br/blog/femtocell-para-iniciantes/>> Acessado em: 19 de junho de 2015.
- [41] 3GPP TS 25.467, UTRAN architecture for 3G Home NodeB (HNB); Stage 2; (Release 9), 2010b.
- [42] FEMTO-FORUM, *RFC 4301: Security Architecture for the Internet Protocol*, White Paper, 2005. Disponível em: <<https://datatracker.ietf.org/doc/rfc4301/>>, acesso em 26 maio 2015.
- [43] CHEN, J. et al. *Femtocells –Architecture & Network Aspects*, Whitepaper, 2010. Disponível em: <<http://www.qualcomm.com/media/documents/files/femtocellsarchitecture-network-aspects.pdf>>. Acesso em: 23 abr. 2015.

- [44] CLAUSSEN, H.; HO, L. T. W.; SAMUEL, L. G. An overview of the femtocell concept. *Bell Labs Technical Journal*, v. , n. , 13 p. 221–245. 2008.
- [45] SUNG, Y. et al. *Femtocell/Macrocell Interference Analysis for Mobile Wimax System*. 5th IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communication Symposium (APWCS 2008), vol.1, Sendai, 2008.
- [46] ZAHIR, T. et al. Interference Management in Femtocells. *IEEE, Communications Surveys and Tutorials*. 2013.
- [47] TYRRELL, A. et al. Use Cases, Enablers and Requirements for Evolved Femtocells. *IEEE VTC2011*, Budapeste, 2011.
- [48] VIVIER, G. et al. Femtocells for next-G Wireless Systems: the FREEDOM approach, *Future Network & Mobile Summit*, Florence, 2010.
- [49] HASAN, S.; SIDDIQUE, N.H.; CHAKRABORTY, S. Femtocell versus WiFi – A Survey and Comparison of Architecture and Performance. 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology. Aalborg, 2009
- [50] WANG, S.; GUO W.; O'FARRELL, T. Energy Efficiency Evaluation of SISO and MIMO between LTE-femtocells and 802.11n Networks. *IEEE. 75<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference*. Yokohama, 2012.
- [51] TUZUNKAN, F.A. et al. Seamless Mobile Data Offloading in Heterogeneous Wireless Networks based on IEEE 802.21 and User Experience. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops*. Istanbul, 2014.
- [52] DIMATTEO, S. et al. Cellular Traffic Offloading through WiFi Networks. *IEEE 8th International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems*. Valencia, 2011.
- [53] QUTQUT, M.H.; AL-TURJMAN, F.M.; HASSANEIN, H.S. *MFW: Mobile femtocells utilizing WiFi: A data offloading framework for cellular networks using mobile femtocells*. IEEE International Conference on Communications. Budapest, 2013.
- [54] LEE J., YI Y. , CHONG S., JIN Y. Economics of WiFi Offloading: Trading Delay for Cellular Capacity. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 13, n. 3, p. 1540 – 1554, 2014.
- [55] 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.
- [56] CARVALHO E. M. *Modelagem e Simulação de Desempenho de Redes de Computadores*. Londrina, 2005.
- [57] JOHNSON T.; MARGALHO M. Avaliação de Desempenho de Sistemas Computacionais. LTC, 2011.
- [58] FRANCÊS, C. R. L.; ARAÚJO J., SILVA M. *Introdução às Técnicas de Avaliação de Desempenho de Redes e Sistemas Distribuídos*. PPGEE-ITEC-UFPA- 2013.



- [59] CASTILHO J. J. M. *Análise da influência da mobilidade em uma aplicação de vídeo em redes mesh*. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). Universidade Federal do Pará. Pará, 2013.
- [60] OPNET Modeler. *Application and Network Performance*. Disponível em: <<http://www.opnet.com>>. Acesso em: 25 jun. 2015a.
- [61] OPNET. Network R&D Solutions for Defense Organizations and System Integrators. 2009. *OPNET Technologies, Inc.* Disponível em: <[https://www.opnet.com/solutions/brochures/R&D\\_Defense.pdf](https://www.opnet.com/solutions/brochures/R&D_Defense.pdf)> Acesso em: 20 jun. 2015b.
- [62] KADHIM D. J.; ABED S. S. Performance and handoff evaluation of heterogeneous wireless networks (hwms) using opnet simulator. *International Journal of Electronics and Communication Engineering & Technology*, v. 4, n. 2, p. 477- 496, 2013.
- [63] DHOMEJA L. et al. A. Performance analysis of wlan standards for video conferencing applications. *International Journal of Wireless & Mobile Networks*, v. 3, n. 6, 2011.